

Mikro-Nano-Integration für metallische Mikrosysteme mit vertikal integrierten Federelementen

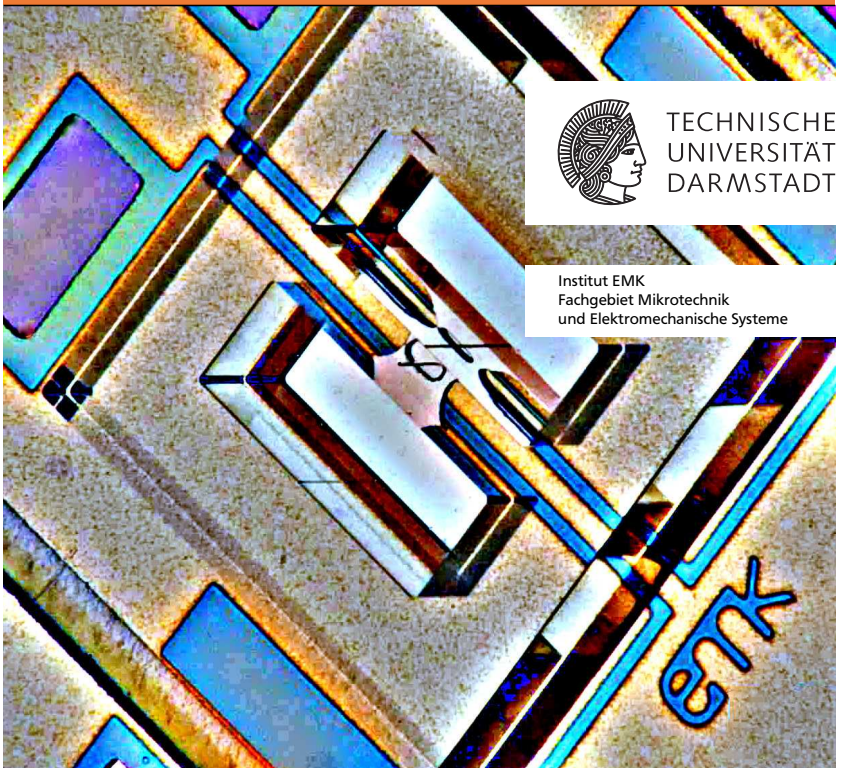
Micro Nano Integration for Metallic Microsystems applying Vertically Integrated Suspension Elements

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation von Felix Greiner aus Schwalmstadt
Oktober 2013 — Darmstadt — D 17



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut EMK
Fachgebiet Mikrotechnik
und Elektromechanische Systeme



Mikro-Nano-Integration für metallische Mikrosysteme mit vertikal integrierten Federelementen

Micro Nano Integration for Metallic Microsystems applying Vertically Integrated Suspension Elements

Genehmigte Dissertation von Felix Greiner aus Schwalmstadt

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
2. Gutachten: Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Ensinger

Tag der Einreichung: 15. August 2013

Tag der Prüfung: 27. September 2013

Darmstadt — D 17

Mikro-Nano-Integration für metallische Mikrosysteme mit vertikal integrierten Federelementen

Vom Fachbereich
Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Felix Greiner

geboren am 27. März 1980
in Schwalmstadt

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
Korreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Ensinger
Tag der Einreichung:	15. August 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	27. September 2013

D 17
Darmstadt 2013

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-36406

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:tuda-tuprints-36406>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints, E-Publishing-Service der TU-Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung-Keine kommerzielle Nutzung-Keine Bearbeitung 2.0 Deutschland



<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/2.0/de/>

Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 15. August 2013

(Felix Greiner)



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) der Technischen Universität Darmstadt. Möglich wurde diese Arbeit durch Teilfinanzierungen aus den BMBF-Projekten INANOMIK [31], INSIGHT [18], 3-DOING [68] und ELEMENT [69].

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak, der mir die Gelegenheit gab, auf dem neuartigen und vielseitigen Gebiet der Mikro-Nano-Integration zu arbeiten, mir einen sehr großen Freiraum bei der Umsetzung gewährte und meine Arbeit durch seine stetige Diskussionsbereitschaft unterstützte.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Ensinger danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Übernahme des Korreferats. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Franko Küppers, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Hofmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Werthschützky für die Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Ich danke allen Mitarbeitern des Instituts EMK, die durch ihre Freundlichkeit und Offenheit für ein sehr angenehmes, kreatives und kooperatives Arbeitsklima sorgen. Insbesondere danke ich Bernhard Jochem und Darina Riemer dafür, das Reinraumlabor im funktionstüchtigen Zustand gehalten und mich im Forschungs- und Institutsalltag stets unterstützt zu haben. Weiterhin danke ich der Studentin Yu Yang und den Studenten Mario El Khoury, Johannes Eberhardt und Sebastian Quednau, mich durch ihre Arbeiten und Anregungen während meiner Forschungsarbeit unterstützt zu haben. Den Mitarbeitern der feinmechanischen Werkstatt unter Leitung von Werner Brunner danke ich für die stets präzise und schnelle Fertigung sowie die wertvollen Hinweise zu Optimierungen der Konstruktionen. Den Mitarbeitern des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie Dr. Markus Guttman und Dr. Pascal Meyer danke ich für ihre technologische Unterstützung und insbesondere das Durchführen der Röntgen-Synchrotron-Lithographie. Frau Prof. Dr. phil. nat. Christina Trautmann danke ich für die Möglichkeit, unkompliziert Arbeiten am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in der Abteilung Materialforschung

durchführen zu können. Darüber hinaus danke ich Bernd Eberhardt von *ebetex* und Edmund Hartung von *Mikrotech* für ihre Unterstützung bei der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Prof. Robert Preißer und Dr. Xihai Kang von *Atotech USA*.

Meinen Eltern Christine und Gernot Greiner und meinem Bruder Hans Greiner danke ich für ihre immer vorhandene Unterstützung. Schließlich danke ich meiner Frau Jennifer Prasiswa, mich stets ermutigt und unterstützt zu haben, für ihre Geduld, manchen fachlichen Hinweis und vor allem ihre Zuversicht.

Darmstadt, im Oktober 2013

Felix Greiner

Zusammenfassung

Mikro-Nano-Integration (MNI) ist ein skalenübergreifender Ansatz, um Nanomaterialien in Mikrosystemen zur Anwendung zu bringen. Die Nanotechnologie bietet vielfältige, vollständig neuartige Effekte sowie wesentlich verstärkt auftretende Effekte und stellt so eine Bereicherung für die Funktionalität von Mikrosystemen dar. Gleichzeitig liefert die Mikrotechnik eine sehr gezielte Anbindung der Nanomaterialien an die Systemtechnik, sodass sich aus geringen Mengen Nanomaterial große Effekte im MNI-System erzielen lassen. Daher ist zu erwarten, dass der Einsatz von Nanomaterialien in Mikrosystemen zukünftig stark anwachsen wird. Das Anwendungsspektrum der MNI-Systeme erstreckt sich bereits heute von einem sehr starken Sektor der Mikrosensorik, über Mikroaktorik, Mikroelektronik und Optik bis hin zu Chemie, Energie und biotechnischen Systemen. Eine umfangreiche Analyse zum Stand der Technik und zum Stand der Standardisierung verdeutlicht die Relevanz des Themenfelds.

Die Technologie zur Integration von Nanomaterialien weist eine Reihe an Herausforderungen auf, da die Integrationsschritte erheblichen Einfluss auf die Nanomaterialeigenschaften haben. In dieser Arbeit werden Verfahren zur Vor-Ort-Synthese hochgeordneter 1-D Nanomaterialien betrachtet, insbesondere galvanisch abgeschiedener metallischer Nanodrähte.

Sind diese Nanodrähte senkrecht stehend auf einem Trägersubstrat verankert, können sie als einseitig eingespannte Biegestäbe betrachtet und in alle lateralen Richtungen flexibel federnd gebogen werden. Diese Eigenschaft macht sich der hier untersuchte Ansatz zum Aufbau eines Inertialsensors zunutze. Fixiert man eine Inertialmasse am freien Ende des Biegestabs, ist diese in erster Näherung mit zwei lateralen translatorischen und zwei lateralen rotatorischen Freiheitsgraden aufgehängt. Somit lässt sich mit einer einzigen Inertialmasse die Beschleunigung in zwei lateralen Raumrichtungen bzw. die Drehrate aus der Ebene hinaus in Richtung der Biegestab-Hauptachse messen. Die Besonderheit dieses Ansatzes liegt in den geringen Abmessungen sowie der Skalierbarkeit des Konzepts. Im Gegensatz zum Stand der Technik bei Silizium-Inertialsensoren wird für Federelement und Masselement deutlich weniger Chipfläche benötigt. Die Arbeit beschreibt die

statische und dynamische Auslegung des Beschleunigungs- und des Drehratensensors einschließlich Stabilitätsbetrachtung des Biegestabs, der Übertragungsfunktionen und der Dimensionierung von der Mikroaktorik.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Fertigung des Technologie-Demonstrators basierend auf den Verfahren UV-Lithographie mit anschließender Galvanoformung (*UV LIGA*) und Röntgen-Synchrotron-Lithographie mit anschließender Galvanoformung (*Röntgen LIGA*). Diese ermöglichen die Fertigung senkrecht stehender dünner Stäbe aus Metall, die als Federelemente dienen, in direkter Umgebung von Metallquadern, die als Inertialmassen fungieren. Mit Hilfe tiefenlithographischer Verfahren auf Basis von UV-Strahlung bzw. von Röntgen-Synchrotron-Strahlung lassen sich Photoresiste so mikrostrukturieren, dass Öffnungen mit Länge-zu-Durchmesser-Verhältnissen (Aspektverhältnissen) von bis zu 14,5 für UV-Strahlung und von bis zu 70 für Röntgen-Synchrotron-Strahlung entstehen. Die Kombination von Lithographieschritten in mehreren aufeinander folgenden Ebenen mit Metallabscheideschritten erlaubt die Vor-Ort-Synthese der Inertialsensor-Funktionselemente.

Im Rahmen dieser Arbeit entstehen so Technologie-Demonstratoren für einachsige, differentiell kapazitiv auswertbaren Beschleunigungssensoren mit Federelementen und Inertialmassen aus galvanisch abgeschiedenem Kupfer. Ihr Aufbau zu Sensor-Demonstratoren mündet in der Charakterisierung des statischen und dynamischen Übertragungsverhaltens. Der Übertragungsfaktor eines Sensor-Demonstrators beträgt 26,46 fF/g. Die Durchmesser der als Federelemente eingesetzten Stäbe lassen sich entsprechend der Auslegung gezielt zwischen 1,5 μm und 75 μm bei Längen zwischen 94 μm und 409 μm einstellen. Die Skalierbarkeit des Konzepts stellt jedoch in Aussicht, auch Submikro- und Nanodrähte mit Durchmessern kleiner als 1 μm einzusetzen.

Diese Arbeit stellt den internationalen Stand der Technik zur Mikro-Nano-Integration in einem neuen Umfang dar. Beispielhaft geht sie intensiv auf die Auslegung eines Multi-Inertialsensor-Technologie-Demonstrators mit nur einer Probemasse und nur einem Federelement ein und stellt so einen wegweisenden Ansatz für neuartige hochminiaturisierte Inertialsensoren vor. Auf technologischer Ebene geht die Arbeit auf neuartige Ansätze zur Optimierung der galvanischen Multiskalenfertigung ein und gibt detaillierte Parameter zur Reproduktion der gesamten Prozesskette an. Erstmals wird die Funktion eines Inertialsensors mit nur einem vor Ort synthetisierten Biegestab aus Metall als Federelement experimentell nachgewiesen.

Abstract

Micro nano integration (MNI) is an approach for the usage of nanomaterial in microsystems covering multiple scales. Nanotechnology offers novel effects and significantly intensifies effects, thus enriching the functionality of microsystems. Microtechnology provides a very specific connection of nanomaterial to systems technology enabling huge effects in MNI-systems even with small amounts of nanomaterial. Therefore, a widespread usage of nanomaterial in microsystems is anticipated. Even today, the applications of MNI-systems already cover various fields such as the sector of microsensors, being highly developed, micro actuators, microelectronics, optics, chemistry, and biotechnological systems. A substantial analysis of the state of the art for technology and standardization points out the importance of this area of research.

Integration of nanomaterial bears diverse challenges as the steps of integration have strong influence on the properties of the resulting nanomaterial. This work investigates methods of in-situ synthesis of highly ordered 1-D materials, in particular of electroformed metallic nanowires.

The nanowires, in this case fixed vertically oriented on substrates, are considered to be unilaterally clamped posts that can be elastically flexed in all lateral directions. The described approach makes use of these properties to build an inertial sensor. An inertial mass fixed to the free end of the flexible post can be regarded as suspended with two laterally translational and two laterally rotational degrees of freedom. Hence a single inertial mass can be used to measure acceleration in two lateral directions or gear-rate out of plane in the direction of the flexible post's main axis. What makes this approach so special are the small dimensions and the scalability of the concept. Compared to the state of the art silicon inertial sensors, the chip size needed for suspension element and mass element are dramatically reduced. This thesis describes the static and dynamic design of the accelerometer and the vibratory gyrometer including a stability analysis of the flexible post, the transfer function, and the dimensioning of the micro actuator.

A further focus is on the fabrication of the technology demonstrator based on UV lithography with subsequent electroforming (*UV LIGA*) and X-ray synchrotron lithography with subsequent electroforming (*Röntgen LIGA*). Both

offer the possibility to fabricate thin metal posts serving as suspension elements in the vicinity of metal cubes serving as inertial masses. Using depth lithography methods based on UV or X-ray radiation, photoresists can be micro structured in a way causing holes with high ratios of depth to diameter. These aspect ratios reach 14.5 for UV and even 70 for X-ray radiation. A combination of lithography steps in several consecutive layers with metal desposition steps allows the in-situ synthesis of the inertial sensor functional elements.

As a part of this thesis, technology demonstrators for one axis sensing accelerometers are fabricated and evaluated by measuring their differential capacitance. Their suspension and mass elements are made of electroformed copper. The assembly of sensor demonstrators leads to the characterization of the static and the dynamic transfer behavior. The transfer factor of one sensor demonstrator is 26,46 fF/g. According to the dimensioning, the diameter of the suspension elements can be varied between 1.5 and 75 μm with lengths ranging from 94 μm to 409 μm . The scalability of this concept even promises the use of submicron and nanowires with diameters less than 1 μm .

This work presents the international state of the art in advanced technology for micro nano integration in a new scope. The dimensioning of a multi-inertial sensor with a single mass and a single suspension element is elaborated in an exemplary fashion. A path breaking approach for highly miniaturized inertial sensors is introduced. On the technological side, this work comprises new approaches to optimize galvanic multi scale fabrication. It gives detailed parameters in order to provide the reproducibility of all steps in the process chain. For the first time, the functionality of an inertial sensor applying only one grown in place metal flexible post as suspension element is proven in experiment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung zur Mikro-Nano-Integration	1
1.1	Von der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie zur Mikro-Nano-Integration	1
1.1.1	Definitionen und Funktionen von Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie	2
1.1.2	Was ist Mikro-Nano-Integration?	6
1.2	Ziele der Arbeit	8
2	Fertigung und Anwendungen von MNI-Systemen	11
2.1	Nanomaterialien und deren Fertigungsverfahren	11
2.2	Integrationstechnik für Nanomaterialien	16
2.2.1	Integrationsschritte und deren Herausforderungen . . .	17
2.2.2	Synthese hochgeordneter 1-D Nanomaterialien	24
2.2.3	Galvanische Abscheidung	37
2.3	Anwendungen	46
2.3.1	Sensorik	47
2.3.2	Aktorik	54
2.3.3	Elektronik	57
2.3.4	Optik	62
2.3.5	Chemie/Energie/Bio	66
3	Inertialsensoren mit senkrechten 1-D-Federelementen	69
3.1	Stand der Technik mikromechanischer Inertialsensoren	69
3.1.1	Beschleunigungssensoren	72
3.1.2	Drehratensensoren	79
3.1.3	Multisensoren für Beschleunigung und Drehrate	89
3.2	Inertialkraftdetektion mit senkrechten 1-D-Federelementen . .	90
3.2.1	Eigenschaften eindimensionaler Federelemente	93
3.2.2	Eigenes Funktionskonzept	101
4	Modell und Auslegung des MNI-Inertialsensors	105
4.1	Stabilität des Stabs	105
4.1.1	Vertikale Drucklast: Knickung des Euler-Stabs	105
4.1.2	Vertikale Zuglast	108

4.1.3	Laterale Biegung und Torsion um vertikale Achse	109
4.2	Statisches Übertragungsverhalten des Beschleunigungssensors	111
4.2.1	Wandlung der Beschleunigung in Auslenkung	111
4.2.2	Wandlung der Auslenkung in Kapazitätsänderung . . .	118
4.3	Dynamisches Übertragungsverhalten des Beschleunigungs- sensors	120
4.3.1	Wandlung von der Beschleunigung in die Auslenkung .	120
4.3.2	Wandlung der Auslenkung in Kapazitätsänderung . . .	130
4.4	Statisches Übertragungsverhalten des Drehratensensors	130
4.4.1	Wandlung der Drehrate in Auslenkung	132
4.4.2	Wandlung der Auslenkung in Kapazitätsänderung . . .	147
4.5	Auslegung des Technologie-Demonstrators zur Beschleuni- gungsmessung	148
4.5.1	<i>UV LIGA</i>	149
4.5.2	<i>Röntgen LIGA</i>	154
5	Fertigung des Inertialsensors	165
5.1	Technologische Gründe für die Gestalt der Mikrostruktur	167
5.2	Kontaktschicht – Ebenen 1 und 1a	167
5.2.1	Schichtabfolge Cr+Cu – Ebene 1	172
5.2.2	Schichtabfolge Cr+Au+Al – Ebene 1	176
5.2.3	Galvanisches Verstärken der Kontaktschicht – Ebene 1a	178
5.3	Opferschicht – Ebene 2	178
5.4	Galvanische Startschicht – Ebene 3	183
5.5	Untere Galvanoform – Ebene 4	185
5.5.1	<i>UV LIGA</i>	185
5.5.2	<i>Röntgen LIGA</i>	191
5.6	Obere Galvanoform – Ebene 5	196
5.7	Galvanisch abgeschiedenes Cu	201
5.8	Planarisiertes Cu	211
5.9	Vereinzelte Chips	212
5.10	Entferntes Polymer	215
5.11	Aufbau- und Verbindungstechnik	219
6	Charakterisierung der Technologie-Demonstratoren	223
6.1	Mikroskopische Untersuchungen	223
6.2	Messungen des Übertragungsverhaltens	231
7	Zusammenfassung und Ausblick	237
7.1	Zusammenfassung	238

7.2 Ausblick	239
Literaturverzeichnis	243
Anhang	243
A Normung in der Nanotechnologie	243
B Top-Down und Bottom-Up	251
C Galvanische Abscheidung	253
C.1 Modell der Abscheidung und Reaktionshemmungen	253
C.2 Abscheidung auf zurückgesetzten Mikroelektroden	258
C.2.1 Definierte Konvektion	260
C.2.2 Kathodische und anodische Verwendung eines edlen Redoxmediators	261
C.2.3 Einsatz von Additiven	263
C.2.4 Partikelfreie Elektrolytversorgung	268
C.2.5 Gleichmäßige Belegungsdichte	269
C.2.6 Charakterisierung der Abscheidebedingungen im Fall Röntgen LIGA	270
D Fertigungstechnologie	277
D.1 Technologische Gründe für die Gestalt der Mikrostruktur	277
D.2 Strukturieren gesputterter Cr-Cu-Schichten	278
D.2.1 Lift-off	279
D.2.2 Ätzen	279
D.3 Sehr dicke Photoresist-Schichten	279
D.3.1 Messverfahren für die spezifische und spektrale Ab- sorption sehr dicker Photoresist-Schichten	281
D.4 Aufbau- und Verbindungstechnik	282
D.4.1 Auszug aus Datenblatt AD 7745 und AD 7746	282
D.4.2 Datenblatt des Keramik-Leergehäuses CSB 01652	286
D.4.3 Anschlussbelegungen der Technologie-Demonstratoren	289
D.4.3.1 UV LIGA	289
D.4.3.2 Röntgen LIGA	292
E Stabilität senkrechter Biegestäbe unter vertikalen Drucklasten	293
E.1 Knickung des Euler-Stabs	293
E.2 Biegung nach Überschreiten der Knicklast	298

E.3	Nicht ideale Verhältnisse	305
E.3.1	Senkrechte Druckkraft auf durchbogenen Biegestab . .	305
E.3.2	Senkrechte Kraft auf schräg stehenden Biegestab . . .	312
E.3.3	Außenmittiger Kraftangriff	315
E.3.4	Variierende Flächenträgheitsmomente	317
E.4	Massebehafteter Biegestab	318

Wissenschaftlicher Werdegang

321

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AAO	Aluminum Anodic Oxide Anodisch oxidiertes Aluminium
AMR	Anisotropic Magneto Resistance Anisotroper Magnetoresistiver Effekt
ANKA	Angströmquelle Karlsruhe
AR	Aspect Ratio Aspektverhältnis
AVT	Packaging Aufbau- und Verbindungstechnik
BEOL	Back End Of Line Verdrahtungsebenen im Halbleiterfertigungsprozess
CAPDAC	CAPacitive Digital-to-Analog Converter Kapazitiver Digital-Analog-Wandler
CDC	Capacitance-to-Digital Converter Kapazitäts-Digital-Wandler
CE	Counter Electrode Gegenelektrode
CEAC	Curvature Enhanced Accelerator Coverage Krümmungsunterstützte Katalysatorbelegung
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter
CNT	Carbon Nano Tube Kohlenstoffnanoröhre
CVD	Chemical Vapor Deposition Chemische Gasphasenabscheidung
DCM	Dichlormethane Dichlormethan
DEP	Dielectrophoresis Dielektrophorese
Dev	Development Entwicklung
DRIE	Deep Reactive Ion-Etching Reaktives Tiefschmelzen

Abkürzung	Bedeutung
DWCNT	Double Walled Carbon Nano Tube Doppelwandige Kohlenstoffnanoröhre
EBID	Electron Beam Induced Deposition Elektronenstrahlinduzierte Abscheidung
EBR	Edge bead removal Randentlackung
ECD	Electrochemical Copper Deposition Elektrochemische Kupferabscheidung
EDL	Electric Double Layer Elektrolytische Doppelschicht
ESEM	Environmental Scanning Electron Microscope Rasterelektronenmikroskop bei geringem Vakuum (nahe Umgebungsdruck)
EUV	Extreme Ultra Violet Extrem ultraviolette Strahlung
Exp	Exposure (Photo)Belichtung
FEOL	Front End Of Line Schaltungsebenen im Halbleiterfertigungsprozess
FIB	Focused Ion Beam Fokussierter Ionenstrahl
GMR	Giganto Magneto Resistance Riesenmagnetowiderstand
HB	Hard Bake Ausheizen
IMU	Inertial Measurement Unit Inertiale Messeinheit
IC	Integrated Circuit Integrierter Schaltkreis
I ² C	Inter-Integrated Circuit „I-squared-C“ Serieller Datenbus „I-Quadrat-C“
IR	Infrared (Emission) Infrarot(e Strahlung)
IT	Ion Track Ionenstrahl
KNMF	Karlsruhe Nano Micro Facility

Abkürzung	Bedeutung
LIGA	ursprünglich: Lithographie Galvanoformung Abformung, heute häufig auch ohne den Schritt „Abformen“
LTI	Linear Time Invariant Linear und zeitinvariant
MEA	Multi Electrode Array Multielektrodenfeld
MEMS	Micro-Electro-Mechanical System Mikroelektromechanisches System
MNI	Micro Nano Integration Mikro-Nano-Integration
MOEMS	Micro-Opto-Electro-Mechanical System Mikrooptoelektromechanisches System
MR	Magneto Resistance Magnetoresistiver Effekt
MST	Microsystem Technology Mikrosystemtechnik
MWCNT	Multi Walled Carbon Nano Tube Mehrwandige Kohlenstoffnanoröhre
NEMS	Nano-Electro-Mechanical System Nanoelektromechanisches System
PC	Polycarbonate Polycarbonat
PC	Personal Computer Einzelplatzrechner
PDMS	Polydimethylsiloxane Polydimethylsiloxan
PEG	Polyethylene glycol Poly-Ethylen-Glycol
PGMEA	Propyleneglycolmethyletheracetate Propylenglycolmethyletheracetat
PMMA	Poly(methyl methacrylate) Polymethylmethacrylat
PVD	Physical Vapor Depositon Physikalische Gasphasenabscheidung
PEB	Post Exposure Bake Tempern nach (Photo)Belichtung

Abkürzung	Bedeutung
Reh	Rehydration Rehydrieren
REM	Scanning Electron Microscope Raster-Elektronen-Mikroskop
Rem	Removal Lackentfernung
RIE	Reaktive Ion Etch Reaktives Ionenätzen
Röntgen LIGA	LIGA unter Verwendung von Röntgen-Strahlung, hier ohne den Schritt „Abformen“
SB	Soft Bake Lacktrocknung durch Ausheizen
SC	Spin Coating Belackung durch Aufschleudern
SCENIHR	Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks Wissenschaftlicher Ausschuss der Europäischen Kommission „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“
SDB	Silicon Direct Bonding Silizium-Direktverbindung
SFB	Silicon Fusion Bonding
SHE	Standard Hydrogen Electrode Standard-Wasserstoff-Elektrode
SNR	Signal to Noise Ratio Signal-zu-Rausch-Verhältnis
SPM	Scanning Probe Microscopy Rastersondenmikroskopie
SPS	bis(3-sulfopropyl)disulfide Dinatriumsalz, Bis-(ω -Sulfo-Propyl)-diSulfid
SWCNT	Single Walled Carbon Nano Tube Einwandige Kohlenstoffnanoröhre
TSV	Through Silicon Via Durchkontaktierung durch Silizium(substrat)
USB	Universal Serial Bus Serielles Bussystem zur Verbindung eines Computers mit externen Geräten
UV LIGA	LIGA unter Verwendung von UV Strahlung, hier ohne den Schritt „Abformen“

Abkürzung	Bedeutung
VLS	Vapor Liquid Solid Dampf-Flüssigkeit-Feststoff-Methode
VSSA	Volume Specific Surface Area Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis
WCVD	Water assisted Chemical Vapor Deposition Mit Wasser unterstützte chemische Gasphasenabscheidung
WE	Working Electrode Arbeitselektrode
WLP	Wafer Level Package Baugruppe auf Substratniveau

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Oberfläche, Querschnittsfläche	m^2
A_0	Geometrische Oberfläche	m^2
\vec{A}	Durchströmte Fläche	m^2
AR	Aspektverhältnis	1
A	Koeffizient zur Lösung einer Differentialgleichung	
a, \vec{a}	Beschleunigung	m / s^2
\underline{a}	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von a	m / s^2
a_x, a_z	Beschleunigung in x -Richtung bzw. in z -Richtung	m / s^2
$\underline{a}_x, \underline{a}_z$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von a_x bzw. von a_z	m / s^2
\vec{a}_{mess}	Zu messende Beschleunigung	m / s^2
$\underline{a}_{\text{mess}}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \vec{a}_{mess}	m / s^2
a	Ausdehnung des elliptischen Biegestab-Querschnitts in x -Richtung	m
\vec{b}	Translatorischer Ortsvektor	m
b	Ausdehnung des elliptischen Biegestab-Querschnitts in y -Richtung	m
B_1	Übertragungsfaktor von der Beschleunigung a in die Auslenkung ξ	s^2
\underline{B}_1	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von B_1	s^2

Symbol	Bedeutung	Einheit
B_2	Übertragungsfaktor von der Auslenkung ξ in die Kapazitätsänderung ΔC	$\text{F s}^2 / \text{m}$
\underline{B}_2	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von B_2	$\text{F s}^2 / \text{m}$
B_3	Übertragungsfaktor von der Kapazitätsänderung ΔC in das Ausgangssignal u^*	$1 / \text{F}$
\underline{B}_3	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von B_3	$1 / \text{F}$
B_{antr}	Übertragungsfaktor des Antriebs	$1 / \text{N m} = \text{s}^2 / \text{kg m}^2$
$\underline{B}_{\text{antr}}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von B_{antr}	$1 / \text{N m} = \text{s}^2 / \text{kg m}^2$
$\underline{B}_{\text{mess}}$	Komplexe, frequenzabhängige Übertragungsfunktion für die Messung der Drehrate	$\text{s} / \text{rad} = \text{s}$
B	Koeffizient zur Lösung einer Differentialgleichung	
\mathbf{b}	Koeffizientenmatrix zur Lösung einer Differentialgleichung	
C_0	Grundkapazität	F
C_l, C_r	Kapazität im linken Luftspalt bzw. im rechten Luftspalt	F
$\underline{C}_l, \underline{C}_r$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von C_l bzw. von C_r	F
C_D	Kapazität, die den Durchtritt der Ionen durch die Helmholtz-Schicht modelliert	F
C_{ad}	Kapazität, die die Adsorption der Ionen an der Arbeitselektrode modelliert	F
C_d	Kapazität, die die Diffusion der Ionen zur Arbeitselektrode modelliert	F
C_0, C_1, C_2	Integrationskonstante	
C	Koeffizient zur Lösung einer Differentialgleichung	
c	Konzentration der Ionen	mol / m^3
c_0	Grundkonzentration der Ionen im Elektrolyten	mol / m^3
c_1	Konzentration der Ionen an der oberen Öffnung des vertikalen Kanals	mol / m^3
c_s	Konzentration der Ionen an der Elektrodenoberfläche	mol / m^3
D	Diffusionskoeffizient	m^2 / s
D_{Cu}	Diffusionskoeffizient von Kuper	m^2 / s

Symbol	Bedeutung	Einheit
D	Koeffizient zur Lösung einer Differentialgleichung	
d	Durchmesser, Dicke	m
d	Korngröße	m
d_0 , $d_{0,\text{soll}}$, $d_{0,\text{ist}}$	Dicke des Luftspalts	m
$d(y_r)$	Luftspaltdicke in Abhängigkeit von der Position in y_r -Richtung	m
d_W , $d_{W,\text{soll}}$, $d_{W,\text{ist}}$	Durchmesser des Biegestabs	m
dy_r	Infinitesimale Tiefe des Flächenstücks in x_r -Richtung	m
d	Dicke der galvanisch abgeschiedenen Schicht	m
\dot{d}	Abscheiderate der galvanisch abgeschiedenen Schicht	$\mu\text{m} / \text{min}$
E	Elastizitätsmodul	$\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2$
\vec{e}_x, \vec{e}_y , \vec{e}_z	Einheitsvektor in x -Richtung bzw. in y -Richtung bzw. in z -Richtung	1
F	Faraday-Konstante= 96485 C / mol	As / mol
F	Kraft	N
\vec{F}_a	Durch die Beschleunigung a hervorgerufene Kraft	N
\underline{F}_a	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \vec{F}_a	N
\vec{F}_m	Kraft zur Beschleunigung der Masse m	N
\underline{F}_m	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \vec{F}_m	N
\vec{F}_n	Federkraft der Nachgiebigkeit n	N
\underline{F}_n	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \vec{F}_n	N
\vec{F}_r	Reibungskraft der Reibungsimpedanz r	N
\underline{F}_r	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \vec{F}_r	N
\vec{F}_C	Coriolis-Kraft	N
$F_{\text{antr},x}$	x -Komponente der Antriebs-Kraft	N
\vec{F}_{gesamt}	Gesamtkraft nach dem Aktionsprinzip	N
\vec{F}_{ext}	Von außerhalb des Beobachtersystems eingebrachte Kraft	N

Symbol	Bedeutung	Einheit
$F_{\text{ext},x},$ $F_{\text{ext},y},$ $F_{\text{ext},z}$	x-Komponente bzw. y-Komponente bzw. z-Komponente von \vec{F}_{ext}	N
$F_{\text{krit,stat}}$	Kritische Kraft unter der Annahme, dass der Masseblock durch die statische Belastung kippt	N
$F_{\text{krit,dyn}}$	Kritische Kraft unter der Annahme, dass der Masseblock durch die dynamische Belastung nicht kippt	N
\vec{F}_x, F_x \vec{F}_z, F_z	Horizontale Kraft auf den Biegestab in x-Richtung bzw. in z-Richtung	N
$\underline{F}_x, \underline{F}_z$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \vec{F}_x bzw. \vec{F}_z	N
f	Schwingfrequenz	Hz
f_0	Resonanzfrequenz	Hz
g	Normalbeschleunigung = $9,81 \text{ m/s}^2$	m/s^2
\underline{h}	Mechanische Impedanz	s^2
$h_M,$ $h_{M,\text{soll}},$ $h_{M,\text{ist}}$	Höhe des Masseblocks	m
I	Flächenträgheitsmoment	m^4
I_x, I_y	Flächenträgheitsmoment bezüglich der x-Richtung bzw. der y-Richtung	m^4
I	Strahlungsintensität	$\text{mW/cm}^2 = 0,1 \text{ W/m}^2$
I_0	Einfallende Strahlungsintensität	$\text{mW/cm}^2 = 0,1 \text{ W/m}^2$
I_t	Transmittierte Strahlungsintensität	$\text{mW/cm}^2 = 0,1 \text{ W/m}^2$
$i, i(t)$	Strom (Zeitwert)	A
i_{lim}	Grenzstrom	A
j	Imaginäre Einheit	
j_0	Austauschstromdichte	$\text{mA/cm}^2 = 0,1 \text{ A/dm}^2$
j_{lim}	Grenzstromdichte	$\text{mA/cm}^2 = 0,1 \text{ A/dm}^2$
K	Rotationsmatrix (3×3)	1

Symbol	Bedeutung	Einheit
K, K_1, K_2	Koeffizientenmatrix bei der Lösung einer Differentialgleichung	
L	Länge	m
L, \vec{L}	Drehimpuls	$\text{kg m}^2 / \text{s}$
\vec{L}_{antr}	Drehimpuls der angetriebenen Rotation	$\text{kg m}^2 / \text{s}$
$l, l_{\text{soll}}, l_{\text{ist}}$	Länge des Biegestabs	m
l_C	Länge vom Fuß des Biegestabs zum Masseschwerpunkt des Masseblocks	m
l_0	Ursprüngliche Länge	m
l_{br}	Länge bei Bruch	m
M, \vec{M}	Drehmoment	N m
\vec{M}_a	Durch die Beschleunigung a hervorgerufenen Drehmoment	N m
\vec{M}_C	Coriolis-Moment	N m
\underline{M}_C	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von \underline{M}_C	N m
\vec{M}_{antr}	Antriebs-Moment	N m
$M_{\text{antr},x}, M_{\text{antr},x_r}$	x -Komponente bzw. x_r -Komponente des Antriebs-Moments	N m
$\underline{M}_{\text{antr}}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung des Antriebs-Moments	N m
$\underline{M}_{\text{antr},x_r}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung des Antriebs-Moments für die Rotation um die x_r -Achse	N m
\vec{M}_{gesamt}	Gesamt-Drehmoment nach dem Aktionsprinzip	N m
M_z	Drehmoment um die z -Achse	N m
M	Molare Masse des abgeschiedenen Metalls	kg / mol
m	Masse	kg
m_{Stab}	Masse des Biegestabs	kg
\vec{N}	Teilchenstromdichte	$\text{mol} / \text{s m}^2$
n	Ganze Zahl	1
n	Mechanische Nachgiebigkeit	$\text{m} / \text{N} = \text{s}^2 / \text{kg}$

Symbol	Bedeutung	Einheit
n_{Stab}	Mechanische Nachgiebigkeit des Biegestabs	$\text{m} / \text{N} = \text{s}^2 / \text{kg}$
n_x	Translatorische Nachgiebigkeit in Bezug auf die x -Achse des Beobachtersystems	$\text{m} / \text{N} = \text{s}^2 / \text{kg}$
n_y	Translatorische Nachgiebigkeit in Bezug auf die y -Achse des Beobachtersystems	$\text{m} / \text{N} = \text{s}^2 / \text{kg}$
$n_{\text{trans},y,\text{visk}}$	Wie n_y jedoch aus $n_{\text{rot},y}$ um den Arbeitspunkt $\varphi = 0$ angenähert	$\text{m} / \text{N} = \text{s}^2 / \text{kg}$
$n_{\text{rot},x},$ $n_{\text{rot},x_r},$ $n_{\text{rot},y}$	Rotatorische Nachgiebigkeit in Bezug auf die x -Achse bzw. auf die x_r -Achse bzw. auf die y -Achse des Beobachtersystems als Drehachse	$1 / \text{N m} = \text{s}^2 / \text{kg m}^2$
$n_{\text{rot},y,\text{Stab}}$	Rotatorische Nachgiebigkeit des Biegestabs in Bezug auf die y -Achse des Beobachtersystems als Drehachse	$1 / \text{N m} = \text{s}^2 / \text{kg m}^2$
\vec{P}_0	Ortsvektor des oberen Biegestabendes in der Grundposition	m
\vec{P}'_0	Ortsvektor des oberen Biegestabendes im ausgelenkten Zustand	m
\vec{P}_1	Ortsvektor der unteren rechten Innenkante des Masseblocks in der Grundposition	m
\vec{P}'_1	Ortsvektor der unteren rechten Innenkante des Masseblocks im ausgelenkten Zustand	m
\vec{P}_2	Ortsvektor der unteren rechten Außenkante des Masseblocks in der Grundposition	m
\vec{P}'_2	Ortsvektor der unteren rechten Außenkante des Masseblocks im ausgelenkten Zustand	m
p	Druck	$\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2$
Q	Ladung	A s
$Q_{\text{intr},\text{Stab}}$	Resonanzgüte nur auf den Biegestab bezogen	1
Q_x	Resonanzgüte der translatorischen Schwingung in Bezug auf die x -Achse	1
$Q_{x,\text{intr}}$	Wie Q_x jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der intrinsischen Dämpfung	1
$Q_{x,\text{mol}}$	Wie Q_x jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der molekularen Dämpfung	1
$Q_{x,\text{Couette}}$	Wie Q_x jedoch unter alleiniger Berücksichtigung des Couette-Anteils der viskosen Dämpfung	1

Symbol	Bedeutung	Einheit
$Q_{x,\text{Stokes}}$	Wie Q_x jedoch unter alleiniger Berücksichtigung des Stokes-Anteils der viskosen Dämpfung	1
$Q_{x,\text{Luftw.}}$	Wie Q_x jedoch unter alleiniger Berücksichtigung des Luftwiderstand-Anteils der viskosen Dämpfung	1
$Q_{x,\text{visk}}$	Wie Q_x jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der gesamten viskosen Dämpfung	1
Q_y	Resonanzgüte der translatorischen Schwingung in Bezug auf die y -Achse	1
$Q_{\text{rot},x}$	Resonanzgüte der rotatorischen Schwingung in Bezug auf die x -Achse als Drehachse	1
Q_{rot,x_r}	Wie $Q_{\text{rot},x}$ jedoch in Bezug auf die x_r -Achse als Drehachse	1
$Q_{\text{rot},x_r,\text{intr}}$	Wie Q_{rot,x_r} jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der intrinsischen Dämpfung	1
$Q_{\text{rot},x_r,\text{mol}}$	Wie Q_{rot,x_r} jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der molekularen Dämpfung	1
$Q_{\text{rot},x_r,\text{visk}}$	Wie Q_{rot,x_r} jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der viskosen Dämpfung	1
$Q_{\text{rot},y}$	Wie $Q_{\text{rot},x}$ jedoch in Bezug auf die y -Achse als Drehachse	1
Q_{rot,y_r}	Wie $Q_{\text{rot},x}$ jedoch in Bezug auf die y_r -Achse als Drehachse	1
$Q_{\text{rot},y,\text{intr}}$	Wie $Q_{\text{rot},y}$ jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der intrinsischen Dämpfung	1
$Q_{\text{rot},y,\text{mol}}$	Wie $Q_{\text{rot},y}$ jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der molekularen Dämpfung	1
$Q_{\text{rot},y,\text{visk}}$	Wie $Q_{\text{rot},y}$ jedoch unter alleiniger Berücksichtigung der viskosen Dämpfung	1
$Q, Q(z)$	Querkraft	N
q_{CF_4}	CF_4 -Gasfluss	sccm = ml / min
R_0	Universelle Gaskonstante = 8,3145 J / mol K	J / mol K
Rat	Abtragsrate beim Planarisieren	$\mu\text{m} / \text{min}$
Re	Reynolds-Zahl für eine Rohrströmung	1
R_s	Für Dickenänderung (squeeze-film) angepasste Reynolds-Zahl	1
Rot	Rotationsgeschwindigkeit	U / min

Symbol	Bedeutung	Einheit
R_D	Widerstand, der den Durchtritt der Ionen durch die Helmholtz-Schicht modelliert	$\Omega = V / A$
R_{ad}	Widerstand, der die Adsorption der Ionen an der Arbeitselektrode modelliert	$\Omega = V / A$
R_d	Widerstand, der die Diffusion der Ionen zur Arbeitselektrode modelliert	$\Omega = V / A$
R_E	Widerstand des Elektrolyten	$\Omega = V / A$
r, \vec{r}	Radius	m
r	Reibungsimpedanz	N s / m
r_x	Translatorische Reibungsimpedanz in Bezug auf die x-Achse des Beobachtersystems	N s / m
r_y	Translatorische Reibungsimpedanz in Bezug auf die y-Achse des Beobachtersystems	N s / m
$r_{trans,y,visk}$	Wie r_y als Modell der viskosen Reibung	N s / m
$r_{rot,x}$	Rotatorische Reibungsimpedanz in Bezug auf die x-Achse des Beobachtersystems als Drehachse	N s / m
r_{rot,x_r}	Rotatorische Reibungsimpedanz in Bezug auf die x_r -Achse des Beobachtersystems als Drehachse	N s / m
$r_{rot,y}$	Rotatorische Reibungsimpedanz in Bezug auf die y-Achse des Beobachtersystems als Drehachse	N s / m
r_{rot,y_r}	Rotatorische Reibungsimpedanz in Bezug auf die y_r -Achse des Beobachtersystems als Drehachse	N s / m
S	Statische Empfindlichkeit des Beschleunigungssensors	s^2
S_k	Knicksicherheit	1
$S_{k,1g}$	Knicksicherheit bei Beschleunigung in z-Richtung von 1 g	1
S_1, S_2	Summand	
s	Operator für die zeitliche Ableitung	1 / s
s_B	s in Bezug auf das Beobachtersystem	1 / s
s_I	s in Bezug auf das Inertialsystem	1 / s
s_x	s in Bezug auf die x-Achse des Beobachtersystems	1 / s
s_y	s in Bezug auf die y-Achse des Beobachtersystems	1 / s
s_z	s in Bezug auf die z-Achse des Beobachtersystems	1 / s

Symbol	Bedeutung	Einheit
s_x	Frequenzparameter der Laplace-Transformation in Bezug auf die x -Achse des Beobachtersystems, gleichbedeutend mit der komplexen Frequenz	1 / s
s_{x_r}	Wie s_x jedoch in Bezug auf die x_r -Achse des Beobachtersystems	1 / s
s_y	Wie s_x jedoch in Bezug auf die y -Achse des Beobachtersystems	1 / s
s_z	Wie s_x jedoch in Bezug auf die z -Achse des Beobachtersystems	1 / s
T	Temperatur	°C, K
T	Zeitpunkt	s
T_{einschw}	Zeitkonstante bis ein eingeschwungener Zustand vorliegt	ms
T_{diff}	Diffusionszeitkonstante	s
t	Zeit	s, min, Std
U	Spannung (Effektivwert)	V
$u, u(t)$	Spannung (Zeitwert), Klemmspannung	V
u^*	Ausgangssignal	
\underline{u}^*	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von u^*	
u_{ref}	Referenzspannung	V
\dot{u}_{ref}	Zeitliche Ableitung der Referenzspannung	V/
u	Mobilität der Ionen	mol s
V	Volumen	m ³
\vec{v}	Geschwindigkeit, Ionengeschwindigkeit im bewegten Fluid	m / s
\vec{v}_{antr}	Geschwindigkeit der angetriebenen Bewegung	m / s
$w(z)$	Horizontale Auslenkung an der Position z	m
$w'(z)$	Horizontale Neigung an der Position z	1
$w''(z)$	Horizontale Krümmung an der Position z	1 / m
$w'''(z)$	Ableitung von $w''(z)$ in z -Richtung an der Position z	1 / m ²
w_l	Horizontale Auslenkung an der Position $z = l$	m
w'_l	Horizontale Neigung an der Position $z = l$	m

Symbol	Bedeutung	Einheit
$w_M,$ $w_{M,soll},$ $w_{M,ist}$	Breite des Masseblocks	m
$w_T,$ $w_{T,soll},$ $w_{T,ist}$	Breite des Spalts im Zentrum des Masseblocks	m
x	x -Komponente des Ortsvektors \vec{b} , Variable zur Kennzeichnung der Position in x -Richtung	m
\underline{x}	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von x	m
\mathbf{x}	Koeffizientenvektor zur Lösung einer Differentialgleichung	
x_r	Um $\pi / 4$ um die z -Achse rotierte x -Achse	
\dot{x}	x -Komponente des Geschwindigkeitsvektors $\mathbf{s}_B \vec{b}$	m / s
\ddot{x}	x -Komponente des Beschleunigungsvektors $\mathbf{s}_B^2 \vec{b}$	m / s ²
y	y -Komponente des Ortsvektors \vec{b} , Variable zur Kennzeichnung der Position in y -Richtung	m
y_r	Um $\pi / 4$ um die z -Achse rotierte y -Achse	
\dot{y}	y -Komponente des Geschwindigkeitsvektors $\mathbf{s}_B \vec{b}$	m / s
\ddot{y}	y -Komponente des Beschleunigungsvektors $\mathbf{s}_B^2 \vec{b}$	m / s ²
z	z -Komponente des Ortsvektors \vec{b} , Variable zur Kennzeichnung der Position in z -Richtung	m
\dot{z}	z -Komponente des Geschwindigkeitsvektors $\mathbf{s}_B \vec{b}$	m / s
\ddot{z}	z -Komponente des Beschleunigungsvektors $\mathbf{s}_B^2 \vec{b}$	m / s ²
z	Wertigkeit des Ions, gleichbedeutend mit der Ladungszahl	1
α	Symmetriekoeffizient, gleichbedeutend mit dem Durchtrittsfaktor der Butler-Volmer-Gleichung	1
ΔC	Kapazitätsänderung	F
$\underline{\Delta C}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von ΔC	F
$\Delta \vec{p}_0$	Vektorielle Verschiebung des oberen Biegestabendes	m
$\Delta \vec{p}_2$	Vektorielle Verschiebung der unteren rechten Außenkante des Masseblocks	m
Δx	Initiale horizontale Auslenkung des Biegestabs am oberen Ende	m

Symbol	Bedeutung	Einheit
Δx_2	x-Komponente der Verschiebung der unteren rechten Außenkante des Masseblocks	m
Δy_2	y-Komponente der Verschiebung der unteren rechten Außenkante des Masseblocks	m
Δz_2	z-Komponente der Verschiebung der unteren rechten Außenkante des Masseblocks	m
Δz_l	z-Komponente der Verschiebung an der Position $z = l$	m
δ_N	Dicke der Nernst'schen Diffusionsschicht	m
δ	Dämpfungskonstante	1
$\bar{\delta}$	Charakteristischer Abstand	m
$\delta(y_r)$	Breite des Flächenstücks in x_r -Richtung	m
ε	Dehnung	1
ε_{br}	Bruchdehnung	1
ε_0	Elektrische Feldkonstante = $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As / V m}$	As / V m
ε_r	Permittivitätszahl	1
η	Überspannung	mV
η_D	Überspannung, die den Durchtritt der Ionen durch die Helmholtz-Schicht modelliert	mV
η_d	Überspannung, die die Diffusion der Ionen zur Arbeitselektrode modelliert	mV
η_C	Überspannung, die die Konzentrationsunterschiede im Elektrolyten modelliert	mV
η_W	Überspannung, die ohm'sche Spannungsabfälle außerhalb der EDL modelliert	mV
η_R	Überspannung, die Reaktionen wie Hydratation modelliert	mV
η_K	Überspannung, die die Kristallisation modelliert	mV
η_{ges}	Zusammenfassung der Überspannungen	mV
$\dot{\eta}$	Zeitliche Ableitung der Überspannung	mV/s
Θ	Massenträgheitsmoment (3×3 -Matrix)	kg m ²
Θ_x	Massenträgheitsmoment bezogen auf die x-Achse als Drehachse	kg m ²
Θ_{x_r}	Massenträgheitsmoment bezogen auf die x_r -Achse als Drehachse	kg m ²

Symbol	Bedeutung	Einheit
Θ_y	Massenträgheitsmoment bezogen auf die y -Achse als Drehachse	kg m^2
Θ_{y_r}	Massenträgheitsmoment bezogen auf die y_r -Achse als Drehachse	kg m^2
$\Theta_{y,\text{Stab}}$	Massenträgheitsmoment des Biegestabs bezogen auf die y -Achse als Drehachse	kg m^2
Θ_z	Massenträgheitsmoment bezogen auf die z -Achse als Drehachse	kg m^2
λ	Wellenlänge	m
λ	Parameter zur Lösung einer Differentialgleichung	
μ	Dynamische Viskosität	$\text{Pa s} = \text{kg / m s}$
μ	Spektrale Absorption	$1 / \mu\text{m}$
ξ	Auslenkung	nm
$\underline{\xi}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von ξ	m / s^2
ρ	Dichte	$\text{g / cm}^3 = 1000 \text{ kg / m}^3$
ρ_{Luft}	Dichte der Luft	$\text{g / cm}^3 = 1000 \text{ kg / m}^3$
σ	Realteil im Frequenzparameter der Laplace-Transformation mit $\sigma > 0$	1
σ	Spannung	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
$\sigma_{\text{Fließgr.}}$	Fließgrenze	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
σ_v	Vergleichsspannung nach von Mises	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
$\sigma_{x,\text{max}}$	Maximale Normalspannung	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
σ_y	Streckgrenze	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
σ_0	Streckgrenze bei sehr großer Korngröße	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
τ	Schubspannung	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
τ_{zx}	Schubspannung unter Torsionsbelastung um die z -Achse	$\text{Pa} = \text{N / m}^2$
φ	Elektrisches Potential	V
φ_{ref}	Elektrisches Potential der Referenzelektrode	V
φ_{Me}	Elektrisches Potential der Metalloberfläche	V

Symbol	Bedeutung	Einheit
φ_{soll} φ_{ist}	Winkel zwischen Substrat und Außenkante der metallischen Mikrostruktur	°
$\vec{\varphi}$	Rotatorischer Ortsvektor	rad = 1
φ_x	Komponente des Ortsvektors $\vec{\varphi}$ zur Rotation um die x -Achse	rad = 1
φ_{x_r}	Wie φ_x jedoch in Bezug auf die x_r -Achse als Drehachse	rad = 1
$\varphi_{x_r, \text{const}}$	Neigung des Masseblocks, die zur Halbierung der Luftspaltdicke am Rand führt	rad = 1
$\underline{\varphi}_{x_r}$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von φ_{x_r}	rad = 1
φ_y	Komponente des Ortsvektors $\vec{\varphi}$ zur Rotation um die y -Achse	rad = 1
$\underline{\varphi}_y$	Komplexe, frequenzabhängige Darstellung von φ_y	rad = 1
$\underline{\varphi}_{y_r}$	Wie $\underline{\varphi}_y$ jedoch in Bezug auf die y_r -Achse als Drehachse	rad = 1
φ_z	Komponente des Ortsvektors $\vec{\varphi}$ zur Rotation um die z -Achse	rad = 1
φ_0	Initiale Neigung des Biegestabs	rad = 1
φ_l	Neigung an der Position $z = l$	rad = 1
$\varphi_{l/4}$	Neigung an der Position $z = l/4$	rad = 1
$\Omega, \vec{\Omega}$	Rotationsgeschwindigkeit	rad / s = 1 / s
Ω_x	x -Komponente der Rotationsgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$	rad / s = 1 / s
Ω_y	y -Komponente der Rotationsgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$	rad / s = 1 / s
Ω_z	z -Komponente der Rotationsgeschwindigkeit $\vec{\Omega}$	rad / s = 1 / s
$ \dot{\Omega}_z _{\text{max}}$	Maximum des Betrags von der zeitlichen Ableitung von Ω_z	rad / s ² = 1 / s ²
$\vec{\Omega}_{\text{mess}}$	Zu messende Rotationsgeschwindigkeit	rad / s = 1 / s
$\vec{\Omega}_{IB}$	Rotationsgeschwindigkeit des Beobachtersystems in Bezug auf des Inertialsystem	rad / s = 1 / s
ω	Kreisfrequenz	rad / s = 1 / s
ω_x	Kreisfrequenz der translatorischen Schwingung in Bezug auf die x -Achse	rad / s = 1 / s
ω_y	Kreisfrequenz der translatorischen Schwingung in Bezug auf die y -Achse	rad / s = 1 / s

Symbol	Bedeutung	Einheit
ω_z	Kreisfrequenz der translatorischen Schwingung in Bezug auf die z -Achse	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$
ω_0	Resonanzfrequenz	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$
ω_{0x}	Resonanzfrequenz der translatorischen Schwingung in Bezug auf die x -Achse	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$
ω_{0y}	Resonanzfrequenz der translatorischen Schwingung in Bezug auf die y -Achse	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$
$\omega_{\text{rot},0x}$	Resonanzfrequenz der rotatorischen Schwingung in Bezug auf die x -Achse	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$
$\omega_{\text{rot},0x_r}$	Resonanzfrequenz der rotatorischen Schwingung in Bezug auf die x_r -Achse	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$
$\omega_{\text{rot},0y}$	Resonanzfrequenz der rotatorischen Schwingung in Bezug auf die y -Achse	$\text{rad} / \text{s} = 1 / \text{s}$

1 Einführung zur Mikro-Nano-Integration

Seit der Einführung der Planartechnik in der Mikroelektronik durch Hoerni [70] hat sich die Strukturtechnik für die Massenproduktion von Halbleiterschaltungen stetig weiterentwickelt. Heute kommen in der Nanoelektronik kritische Strukturweiten von 32 nm (DRAM $\frac{1}{2}$ pitch) bzw. 20 nm (Flash $\frac{1}{2}$ pitch) zum Einsatz [71]. Zur Versorgung dieser millionenfach replizierten, hochstandardisierten Schaltungen kommen weiterhin mikrostrukturierete Leiterbahnen zum Einsatz. Auf einem Substrat für Halbleiterschaltungen sind also Nano- mit Mikro-Strukturen verbunden.

Die Miniaturisierung feinwerktechnischer Sensoren in Richtung von Mikrosystemen hat mit dotierten Silizium-Membranen in den 1960er Jahren [72] begonnen und ist mit funktionsbestimmenden Schichtdicken im Magnetfeldsensor von 2 nm bei geringen Toleranzen nicht am Ende [29]. Im Gegensatz zu reinen Halbleiterschaltungen sind Mikrosysteme weniger standardisiert, sondern stärker anwendungsspezifisch ausgelegt. Der Trend zur Miniaturisierung und Funktionsintegration ist auch hier stetig, jedoch lässt sich dies nicht an einer signifikanten Kennzahl festmachen [73].

Dieses Kapitel führt zum Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik hin und mündet im Kern der Arbeit, den *skalenübergreifenden Fragestellungen der Mikro-Nano-Integration (MNI)*.

1.1 Von der Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie zur Mikro-Nano-Integration

Bedeutend für Mikrosysteme ist, in geringem Bauraum viele verschiedene Funktionen unterzubringen. Die Nanotechnologie ermöglicht neue Effekte bei sehr geringem Materialeinsatz. So eröffnet sie der Mikrosystemtechnik neue Funktionen, neue Funktionsprinzipien und eine weitere Miniaturisierung [74]. Die folgenden Definitionen und Charakteristika der Mikrometer- und der Nanometerskala verdeutlichen das Multiskalenproblem beim Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik.

1.1.1 Definitionen und Funktionen von Mikrosystemtechnik und Nanotechnologie

Die **Mikrosystemtechnik (MST)** adressiert vor allem die Größenskala **100 nm - 100 µm**. Abbildung 1.1 a) visualisiert, wie die Wortbestandteile „Mikrotechnik“ und „Systemtechnik“ die beiden Standbeine der MST beschreiben. Durch mikrotechnische Fertigungsverfahren, wie der Schichttechnik, werden Funktionen verschiedener Domänen realisiert. Diese können auch als Multi-Domänen-Anwendung in einem Bauteil ausgeführt sein und so z. B. Mikroelektronik mit Mikromechanik kombinieren. Die Systemtechnik kombiniert diese Funktionen z. B. zu einem Beschleunigungssensor und verwendet dazu die Aufbau- und Verbindungstechnik.

Die Dimensionen der Mikrotechnik reichen durchaus oft in den Nanometerbereich hinein, wobei in der Mikrotechnik häufig Volumeneigenschaften (bulk) der Materialien funktionsbestimmend sind. Dahingegen konzentriert sich die Nanotechnologie stärker auf Oberflächeneffekte.

Die **Nanotechnologie** umfasst vornehmlich Strukturen auf der Skala **1 nm - 100 nm**. Abbildung 1.1 b) greift die Systematik der Darstellung für die MST auf und ordnet ihr die Terminologie der Internationalen Standardisierungsorganisation (ISO) zu – für Details zur Normung vgl. Anhang A. Die Nanotechnologie besteht also aus einer Kombination der folgenden Punkte:

1. *Strukturen im Nanomaßstab, also zwischen 1 und 100 nm:* Die Nanotechnologie befasst sich mit Objekten, deren Außenmaß, Innenmaß oder Oberflächenstruktur kleiner als 100 nm sind. Die Untergrenze 1 nm schließt aus, dass einzelne Atome und kleine Atomgruppen als Nanoobjekte oder Bestandteile von Nanostrukturen bezeichnet werden.
2. *Neue Funktionen nutzen:* Es kommen neuartige charakteristische Effekte und Phänomene zum Einsatz, die erst bei Strukturen im Nanomaßstab auftreten bzw. dominante Wirkung zeigen. Diese Effekte werden genutzt um Produkte herzustellen und / oder neuartige Prozesse anzuwenden.
3. *Technologisch herstellen und verarbeiten:* In der Nanotechnologie werden Nanomaterialien – also Nanoobjekte, nanostrukturiertes Material und komplexe Strukturen bzw. Nano-Baugruppen – gezielt hergestellt und gehandhabt.

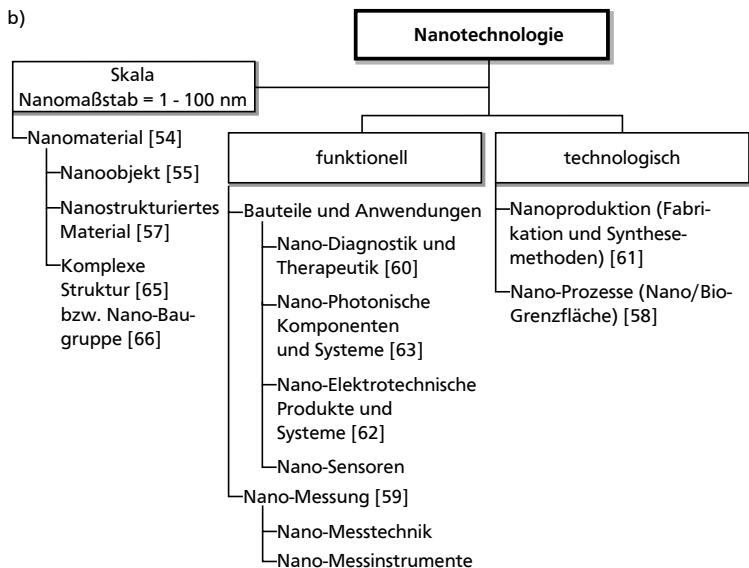
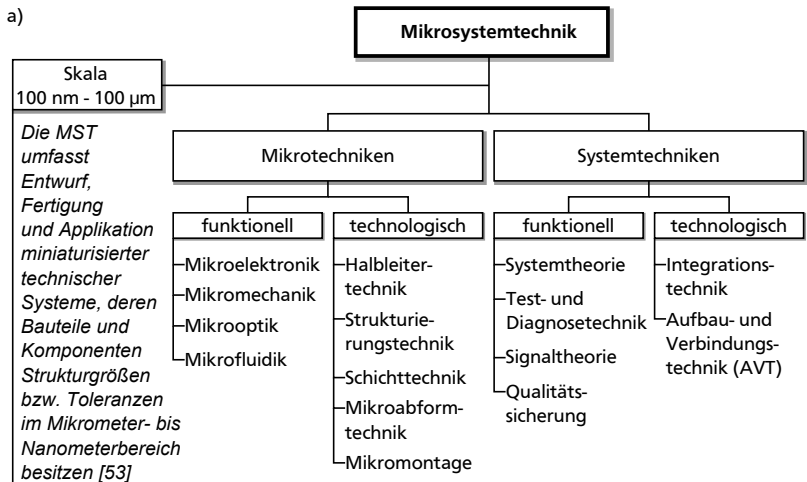


Abbildung 1.1: Begriffsdefinitionen: a) Mikrosystemtechnik (MST) nach [53], b) Nanotechnologie nach den technischen Spezifikationen der Internationalen Organisation für Normung (ISO) in Anlehnung an [53, 65, 75–77], vgl. Anhang A.

Beim Übergang von Mikrometer-Abmessungen zum Nanomaßstab treten Phänomene auf, die sich grob drei Gruppen zuordnen lassen:

1. Das *Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis* steigt: Oberflächenphänomene wie z. B. die Kraftwechselwirkung zwischen zwei Oberflächen ändern sich. Schwache Wechselwirkungen wie die Van-der-Waals-Kräfte werden erst bei nanostrukturierten Oberflächen makroskopisch nutzbar. Dominieren bei Mikrometer-Abmessungen Kapillarkräfte, sind es beim Nanomaßstab die Kräfte der Brownschen Bewegung. Auch die Reaktivität z. B. von Katalysatoren steigt bezogen auf den Materialeinsatz. Vor dem Hintergrund gesundheitlicher Risiken ist daher aktuell das Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis (Volume Specific Surface Area – VSSA) als Maß für die Einstufung als Nanomaterial in Diskussion. Das SCENIHR der Europäischen Union (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) schlägt eine Untergrenze von $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ vor [78] und schließt damit auch große Agglomerate und Aggregate ein, vgl. Abbildung 1.2.
2. Die *Geschwindigkeiten* physikalischer Vorgänge steigen: Durch die kurzen Distanzen gewinnt z. B. der diffusive Stofftransport an Bedeutung. Durch besonders geringe Abmessungen sind weiterhin beispielsweise sehr hohe Schwingfrequenzen möglich, sodass mechanische Resonatoren in Anwendungsgebiete bisher elektrisch dominierter Resonatoren vorstoßen [79–81].
3. Die *kritische Länge eines physikalischen Vorgangs* wird unterschritten: Ist eine Abmessung z. B. geringer als die Wellenlänge des Lichts, ändern sich die optischen Eigenschaften des Materials. Beispielsweise sinkt der Absorptionsindex K einer Goldschicht ab einer kritischen Länge von etwa 20 nm drastisch ab, was von der minimalen Schichtdicke einer blickdichten Metallbeschichtung bekannt ist [82].

Abbildung 1.2 stellt vergleichend das geometrische Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis verschiedener Nanoobjekte dar – kugelförmiger Nanopartikel (0-D-Objekt), zylinderförmiger Nanofasern (1-D-Objekt) und schichtförmiger Nanoplättchen (2-D-Objekt). Die Klassifizierung als 0-D-, 1-D- und 2-D-Objekt leitet sich aus den unter dem Lichtmikroskop sichtbaren Dimensionen der räumlichen Ausdehnung ab. 3-D-Objekte sind nach dieser Systematik aus 0-D- bis 2-D-Objekten zusammengesetzt bzw. weisen eine interne Struktur im Nanomaßstab auf, vgl. Tabelle 2.1. Insbesondere 1-D-Objekte überschreiten in dieser geometrischen Betrachtung die

Nanomaterial-Grenze des SCENIHR von $60 \text{ m}^2/\text{cm}^3$ bei einem Durchmesser von 67 nm.

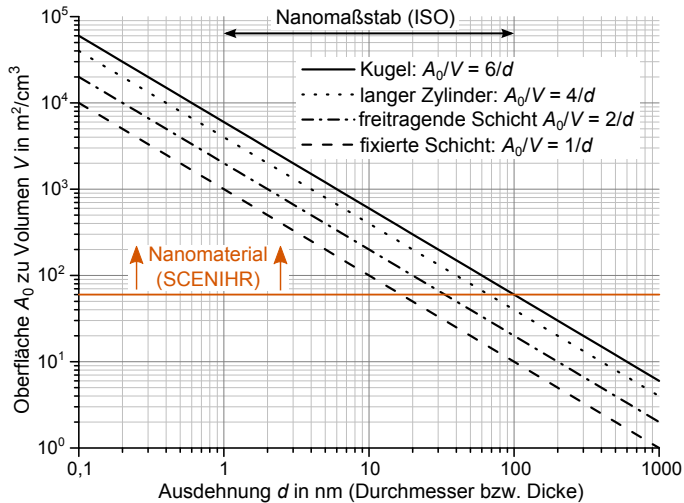


Abbildung 1.2: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis von Nanoobjekten mit Kennzeichnung des Nanomaßstabs nach ISO [54] und der Grenze zur Einstufung als Nanomaterial nach SCENIHR [78].

Einige Funktionen der Nanotechnologie sind bereits von Produkten aus dem Alltag bekannt wie Antihaftschichten auf Photomasken in der Lithographie um deren Standzeit in der Produktion zu erhöhen, mineralischer Sofort-UV-Schutz in Sonnencreme mit nanopartikulärem Titandioxid, antibakterielle Ausstattung von Textilien mit nanopartikulärem Silber oder nicht klumpendes Speisesalz mit Rieselhilfe aus nanopartikulärem Siliziumdioxid. Bei diesen makroskopischen Produkten kommen große Mengen Nanomaterials zum Einsatz, deren Auswirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit des Menschen nicht vollständig bekannt sind.

Beim Einsatz von Nanomaterialien in der Mikrosystemtechnik können mit wesentlich geringeren Materialvolumina neue Effekte genutzt werden.

1.1.2 Was ist Mikro-Nano-Integration?

Die Mikro-Nano-Integration behandelt die Einbettung von Nanomaterial – also Nanoobjekte, nanostrukturiertes Material und komplexe Strukturen bzw. Nano-Baugruppen – in Mikrosysteme. Sie umfasst außerdem den Einsatz Nanotechnologie-basierter Effekte zur Fertigung oder für den Betrieb von Mikrosystemen. Die Vermittler-Rolle der Mikrosystemtechnik ermöglicht dabei den Brückenschlag aus der Nanometerdimension über die MST in die Makrowelt der Produkte, vgl. Abbildung 1.3 a).

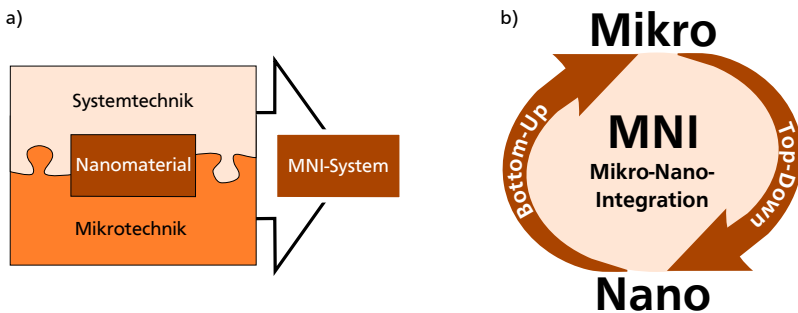



Abbildung 1.3: Umfang der Mikro-Nano-Integration (MNI): a) Integration von Nanomaterialien mit Hilfe von Mikrotechniken und Systemtechniken zum Aufbau von MNI-Systemen, b) Herangehensweisen der MNI zum Brückenschlag zwischen der Mikro- und der Nanometerskala – Top-Down und Bottom-Up.

Im amerikanischen Sprachraum bezeichnet man Mikrosysteme als Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS). MNI-Systeme gehören dort zu den Nano-Electro-Mechanical Systems (NEMS), wobei eine klare Abgrenzung nicht immer stattfindet. NEMS sind zumeist in klassischer Weise weiter verkleinerte MEMS. Im Gegensatz dazu fokussiert sich die MNI auf den Einsatz von Nanotechnologie für und in Mikrosystemen. So ergeben Nanotechnologie, Mikrotechnik und Systemtechnik die Mikro-Nano-Integration. Die MNI lässt sich anhand der verwendeten Verfahren grundsätzlich in zwei Herangehensweisen einteilen, vgl. Abbildung 1.3 b) und Anhang B:

- *Top-Down:* Mit weiterentwickelten Methoden der MST funktionsbestimmendes Nanomaterial in Mikrosystemen erzeugen oder dort einbringen. Grundgedanke: Struktur von außen einem Material aufprä-



sich viele Funktionen in kleinem Bauvolumen integrieren bzw. eine hohe Zuverlässigkeit durch redundanten Aufbau bei gleichem Bauvolumen realisieren. Die Bedeutung dieser Zusammenhänge spiegelt sich wider in mehreren von der Europäischen Kommission identifizierten „Key Enabling Technologies“ [83] sowie in den Schlüsseltechnologien der Hightech-Strategie 2020 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung [84].

1.2 Ziele der Arbeit

Bringt man Nanomaterialien in Mikrosysteme ein, ergeben sich wissenschaftliche Fragestellungen der Multiskalen-Integrationstechnik. Diese schließen technologische Aspekte der Fertigungsverfahren ebenso ein wie funktionelle Gesichtspunkte des Systemdesigns. Ihr Fokus liegt auf der Mikro-Nano-Schnittstelle reicht aber auch darüber hinaus.

Eine Übersicht zu 0-D- bis 3-D-Nanomaterialien wie z. B. den Kohlenstoffnanoröhren oder metallische Nanodrähte soll den Beginn der Arbeit bilden. Damit wird die technologische und funktionelle Beschreibung der Nanomaterialien aus Sicht der Mikrosystemtechnik eingeleitet.

Darauf aufbauend sind die technologischen Aspekte der Integrationstechnik zu analysieren mit dem Ziel, die Kernprobleme bei der praktischen Umsetzung der MNI zu identifizieren. Vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Nutzbarkeit der Forschungsergebnisse sind Bottom-Up-Ansätze vorzuziehen, die idealerweise prozesstechnisch im Mehrfachnutzen (Batch) skalierbar sein sollen. Ein wesentliches Augenmerk muss auf der Prozesskompatibilität der einzelnen Schritte liegen, beispielsweise hinsichtlich der Temperaturbelastung. Das sich damit öffnende weite Feld der Mikro-Nano-Integration soll anhand von technischen Beispielen konkretisiert werden.

Mit dem Wissen über die Eigenschaften integrierbarer Nanomaterialien sind die funktionalen Notwendigkeiten elektromechanischer Mikrosysteme zu prüfen und auf Überschneidungen hin zu eruieren. Dazu sollen beispielhaft Inertialsensor-Designs analysiert werden, um Verbesserungspotentiale durch den Einsatz von Nanomaterialien aufzuzeigen. Insbesondere soll ein Augenmerk auf dem Flächenbedarf – *footprint* – von mit Oberflächen-Mikromechanik gefertigten Systemen liegen, der bei lateral integrierten Federelementen und Inertialmasse-Elementen aus Silizium-Materialien den Spielraum für die Miniaturisierung einschränkt. Daran anknüpfend gilt es einen MNI-Beschleunigungssensor auszulegen.

Der Fertigungsprozess dieses Demonstrators ist vorzugsweise montagefrei auszulegen, wodurch sich das Multiskalen-Problem in die Prozesstechnik verlagert. Beim Einsatz von vertikal integrierten 1-D-Objekten – z. B. metallischer Drähte – als Federelemente in Inertialsensoren ergibt sich somit die Problemstellung der prozessintegrierten Fertigung von wesentlich größeren Inertialmassen. Kommen Mikro- und Nanogalvanoformung zum Einsatz, bildet sich ein prozesstechnisches Kernproblem in der Abscheidung mit heterogenem Aspektverhältnis ab. Abschließend soll der entworfene Inertialsensor experimentell aufgebaut und charakterisiert werden.



2 Fertigung und Anwendungen von MNI-Systemen

Mikrosysteme mit Nanomaterialien stellen für die Nanotechnologie eine Chance dar, denn sie verbinden eine hohe Wertschöpfung bei geringem Materialeinsatz mit einem sehr geringen und gut beherrschbaren Gefahrenpotential [66]. Die Herausforderung liegt darin, reproduzierbar die herausragenden Eigenschaften von Nanomaterialien in mikro- und makroskopische Funktionseinheiten einzubringen sowie in Anwendungen zu überführen.

Dieses Kapitel diskutiert Nanomaterialien, deren Fertigungsverfahren sowie Ansätze zur Fertigung von MNI-Systemen. Es zeigt auf, in welchen Anwendungen Mikro-Nano-Integration heute bereits zum Einsatz kommt und wo sie zukünftig zum Einsatz kommen kann.

2.1 Nanomaterialien und deren Fertigungsverfahren

Nanomaterialien – also Nanoobjekte, nanostrukturiertes Material sowie komplexe Strukturen und Nano-Baugruppen – sind Bausteine der Mikro-Nano-Integration. Man kann sie daher auch als nanoskalige Basisstrukturen bezeichnen [29]. Die Forschungen der Nanotechnologie haben zu einer Vielzahl neuartiger Nanomaterialien geführt. Sie sollen hier hinsichtlich der Anzahl ihrer räumlichen Dimensionen, die unter dem Lichtmikroskop sichtbar sind, in 0-D bis 3-D unterschieden werden, vgl. Tabelle 2.1. 0-D-Nanomaterialien umfassen Nanopartikel und damit z. B. Fullerene. 1-D-Nanomaterialien beschreiben Nanofasern und damit z. B. Kohlenstoffnanoröhren (CNT). 2-D-Nanomaterialien sind Schichten bzw. Plättchen mit einer Dicke im Nanomaßstab und zu dieser Gruppe gehören z. B. Graphen und Kohlenstoff-Nanobänder. 3-D-Nanomaterialien zeichnen sich durch eine interne Struktur oder Oberflächenstruktur im Nanomaßstab aus. Sie umfassen neben dem nanostrukturierten Material auch komplexe Strukturen bzw. Nano-Baugruppen, die aus 0-D- bis 2-D-Nanomaterialien zusammengesetzt sind. Beispiele dieser 3-D-Nanomaterialien sind nanostrukturierte Aggregate sowie 3-D-strukturierter Photolack. Weitere Details zu Nanomaterialien nach den technischen Spezifikationen der Internationalen Organisation für Normung (ISO) sind in Anhang A beschrieben.

Tabelle 2.1: Übersicht über Nanomaterialien in Ergänzung zu Abbildung 1.1.

Nanomaterial	Mögliche Ausführungen
0-D: drei Außenmaße im Nanomaßstab <ul style="list-style-type: none"> • Nanopartikel [55] 	<ul style="list-style-type: none"> • Nanozwiebel (Nanopartikel mit konzentrischer Mehrschalenstruktur) [56] • Nanokegel (kegelförmiges Nanopartikel) [56] • Quantenpunkt (kristallines Nanopartikel mit Quanten-Confinement-Effekten) [55] • Arten von Kohlenstoff-Nanopartikeln [56] <ul style="list-style-type: none"> – Fulleren [56] – Fullerenderivat [56] – endohedrales Fulleren [56] – Metallofulleren [56] – Kohlenstoff-Nanozwiebel [56]
1-D: zwei Außenmaße im Nanomaßstab <ul style="list-style-type: none"> • Nano-Linienelement • Nanofaser [55] 	<ul style="list-style-type: none"> • Nanodraht (elektrisch leitende Nanofaser) [55] • Nanoröhrchen (hohle Nanofaser) [55] • Nanostäbchen (starre Nanofaser) [55] • Nanokegel (kegelförmige Nanofaser) [56] • Arten von Kohlenstoff-Nanofasern [56] <ul style="list-style-type: none"> – Kohlenstoff-Nanofaser (CNF) [56] <ul style="list-style-type: none"> * Graphit-Nanofaser [56] – Kohlenstoff-Nanoröhrchen (CNT) [56] <ul style="list-style-type: none"> * einwandiges Kohlenstoff-Nanoröhrchen (SWCNT) [56] * mehrwandiges Kohlenstoff-Nanoröhrchen [56] <ul style="list-style-type: none"> · doppelwandiges Kohlenstoff-Nanoröhrchen (DWCNT) [56] * Trichterstapel-Kohlenstoff-Nanoröhrchen (Ineinander-gestapelte abgestumpfte Nanokegel) [56] * Kohlenstoff-Nanoerbsenschote (lineare Anordnung von Fullerenen im CNT) [56] – Kohlenstoff-Nanohorn (CNT im Nanokegel-Scheitel) [56]
2-D: ein Außenmaß im Nanomaßstab <ul style="list-style-type: none"> • Nanoschicht • Nanoplättchen [55] 	<ul style="list-style-type: none"> • Einfachschichten (organisch, anorganisch) • Mehrfachsichten (organisch, anorganisch) • Nanoband (ein Außenmaß im Nanomaßstab) [56] • Arten von Kohlenstoff-Nanoplättchen [56] <ul style="list-style-type: none"> – Kohlenstoff-Nanoband [56]
3-D: nur Innenmaße im Nanomaßstab <ul style="list-style-type: none"> • Nanostrukturiertes Material (Interne Struktur oder Oberflächenstruktur im Nanomaßstab) [57] • Komplexe Struktur [65], Nano-Baugruppe [66] 	<ul style="list-style-type: none"> • Nanostrukturiertes Aggregat (Aggregat aus Nanoobjekten) [57] • Nanostrukturiertes Kern-Hülle-Partikel (Kern oder Hülle(n) im Nanomaßstab jedoch Außenmaß größer) [57] • Nanostrukturierte Kapsel (Hülle im Nanomaßstab) [57] • Fester Nanoschaum (Feststoff mit Gaseinlagerung im Nanomaßstab) [57] • Nanoporöses Material (Feststoff mit Nanoporen) [57] <ul style="list-style-type: none"> – Nanokanäle, die den Feststoff vollständig durchdringen – Nanoporige Oberflächenstruktur, z. B. Nanorasen • Nanodraht-Array [85] • Nanodraht-Netzwerk [85] • Nanoröhrchen-Array [86, 87] • Hierarchische Struktur [85] • 3-D-strukturierter Photolack [29]

Tabelle 2.2 stellt vergleichend einige in der MNI relevante Fertigungsverfahren für Nanomaterialien dar, die teilweise auch in der Mikrotechnik zum Einsatz kommen [27, 29, 88]. Detaillierte Beschreibungen der Verfahren zur Fertigung anorganischer Mikro- und Nanomaterialien sind in [89–92] sowie für CNT in [93] zu finden.

Die Mikrotechnik setzt im Vergleich zu vielen anderen Branchen nur kleine Materialmengen ein, ebenso die Mikro-Nano-Integration. Beispielsweise haben die ca. 196 Drähte im Nanodrahtarray nach Abbildung 2.10 d) eine Masse von insgesamt lediglich 0,57 ng (Annahme: Arraydurchmesser 50 μm , Drahtdicke $10^5/\text{mm}^2$, Drahtdurchmesser 80 nm, Drahtlänge 30 μm , Drahtmaterial Gold). Der erwünschte Effekt auf der Nanometerskala – z. B. das große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis – muss zuverlässig von einem geringen Nanomaterial-Volumen erbracht werden. Unter anderem deshalb sind die Qualitätsanforderungen an das Material in der MNI höher als bei vielen makroskopischen Anwendungen, in denen Nanomaterialien als „Schüttgut“ z. B. in Lotusfarben zum Einsatz kommen. Um dem nachzukommen, setzt man relativ kostenintensive Fabrikationsverfahren ein. Durch die kleinen Nanomaterial-Volumina wirkt sich der Einsatz beispielsweise von teuren Edelmetallen nur geringfügig auf die Systemkosten aus.

Chemische Funktionalisierungen können für den Einsatz der Nanomaterialien notwendig sein, z. B. um den Abstand zwischen Nanoobjekten in einer Matrix einzustellen, vgl. Abbildung 2.1. Beispielsweise ist unter Umständen ein Agglomerieren oder Aggregieren der Nanoobjekte zu verhindern, um die charakteristischen Eigenschaften der Nanomaterialien im Mikrosystem zum Einsatz bringen zu können.

Die viel diskutierten Gefahren der Nanotechnologie [94] sind derzeit Gegenstand der Forschung [95, 96] und begründen sich vor allem auf der Kleinheit der Nanoobjekte, auf die die Schutzmechanismen des Körpers nicht eingerichtet sind. Beispielsweise werden sie nicht von den Makrophagen (Fresszellen) erkannt und entfernt, was zu Entzündungen der Lunge führen kann [97]. Werden große Materialmengen eingesetzt, sind Untersuchungen der Toxizität [98, 99], Arbeitsschutzmaßnahmen [100, 101] und der Einfluss auf die Umwelt zu beachten [102]. Allerdings neigen die Nanoobjekte zum Agglomerieren, was ihr Gefahrenpotential verringert. Der sehr gezielte Einsatz von Nanomaterialien in der Mikro-Nano-Integration sowie die feste Verbindung der geringen Materialvolumina mit den technischen Systemen reduziert die Gefahr auf ein Minimum. Liegt das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (wie beispielsweise von Nanodrähten mit 80 nm Durch-

Tabelle 2.2: Fabrikationsverfahren für Nanomaterialien mit dem Einsatzziel in der Mikro-Nano-Integration.

Verfahren	Charakteristika	Nanomaterial			
		0-D	1-D	2-D	3-D
Nanolithographie (Top-Down)	EUV (extrem ultraviolette Strahlung, $\lambda = 1 \dots 50 \text{ nm}$): Sehr stark parallelisiert, nur planare Strukturen (ca. 45 nm) möglich			X	
	Röntgen-Lithographie: Stark parallelisiert, aufwändige Optik und Maskentechnik		X	X	
	Ionenstrahl-Lithographie: parallelisiert, sehr aufwändige und seltene Technik, statistisch verteilte Nanoordnung		X		X
	Elektronenstrahlinduzierte Abscheidung (EBID): Sehr kleine Strukturen möglich, langsam		X	X	X
	Laser-Lithographie / 2-Photonen-Polymerisation: Sehr kleine Strukturen möglich, langsam		X	X	X
	NanoImprint-Lithographie: Stark parallelisiert, aufwändige Stempelfertigung		X	X	X
Physical Vapor Deposition PVD (Top-Down)	Gut einstellbare Schichtdicke und –homogenität, Vakuumverfahren, 0-D auf Substrat fixiert, lose nur über Umweg der Abscheidung auf Flüssigkeit möglich	X		X	
Chemical Vapor Deposition CVD (Bottom-Up)	Gut einstellbare Schichtdicke und –homogenität, Vakuumverfahren CNT-Wachstum mit hoher Rate mit und ohne Templat möglich, Große Materialvielfalt (Organika, Metalle, Halbleiter)		X	X	
RIE bzw. DRIE mit Selbstmaskierung (Bottom-Up)	Stark parallelisiert, statistisch verteilte Nanoordnung		X		
Sol-Gel (Bottom-Up)	Hohe Partikelgüte, kleine Fertigungsvolumina möglich, günstige Anlagen möglich	X		X	
Galvanische Abscheidung (Bottom-Up)	Günstige Anlagen und Materialien, Wachstum auch in Templat möglich, selektive Abscheidung möglich, für 0-D nur Metalle und Oxide möglich,	X	X	X	X
Flammpyrolyse (Bottom-Up)	Etablierte Massenfertigung, starke Aggregatbildung der 0-D-Partikel durch lange Verweilzeit im Reaktor	X			

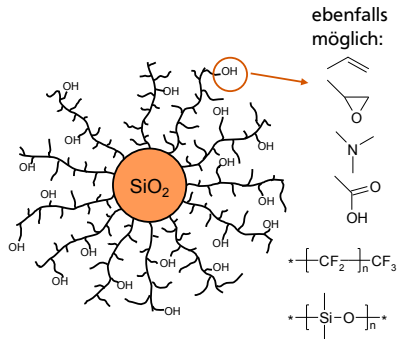


Abbildung 2.1: Funktionalisierung von Siliziumdioxid-Partikeln [29] (Merck KGaA, Darmstadt).

messer in geometrischer Betrachtung) unterhalb der Nanomaterial-Grenze des SCENIHR von $60\text{ m}^2/\text{cm}^3$, ist nach aktuellem Stand nicht von einer Gefährdung auszugehen. Zudem werden bei der Fertigung in Reinraumatmosphäre Nanomaterial und Mensch gegenseitig vor einander geschützt — der Mensch kontaminiert das Nanomaterial nicht und das Nanomaterial schädigt den Menschen nicht [66]. Selbst bei versehentlicher Freisetzung von Nanomaterialien lässt sich dies sensorisch überwachen, da im Gegensatz zur normalen Raumluft unter Reinraumatmosphäre eine definiert geringe Nanoobjekt-Konzentration vorliegt. Darüber hinaus werden häufig Verfahren eingesetzt, die die wertvollen und fragilen Nanoobjekte sofort nach ihrer Herstellung kapseln. Die Umweltverschmutzung bei Gebrauchsende ist sehr eingeschränkt, da elektronische Geräte dem Recycling zugeführt werden müssen. Selbst bei Beschädigung der Bauteile können im schlimmsten Fall nur geringste Mengen Nanomaterials freigesetzt werden.

2.2 Integrationstechnik für Nanomaterialien

Für die Anordnung von Nanomaterialien auf mehreren Skalen sei zwischen zwei Ebenen unterschieden:

Nanoordnung: Die Anordnung der Nanoobjekte und komplexen Strukturen im Nanometermaßstab, z. B. der Abstand der Nanopartikel im Nanokomposit oder die Distanz paralleler Nanofasern.

Mikroordnung: Die Anordnung der Nanomaterialien im Mikrometermaßstab, z. B. die Abmessungen eines Nano-Komposit-Tropfens oder die Dimensionen eines Nanofaser-Bündels.

Beide Ebenen spielen sowohl für die Eigenschaften der integrierten Nanomaterialien als auch für die Anwendbarkeit von Technologien zur Integration eine entscheidende Rolle.

Prozesstechnisch lassen sich ebenfalls zwei Klassen definieren:

Separate Synthese: Sie erlaubt den Einsatz speziell optimierter Materialien, bedingt jedoch die Herausforderung diese Eigenschaften bei Integrationsschritten zu bewahren.

Vor-Ort-Synthese: Sie erzeugt die Nanomaterialien direkt im Mikrosystem und verlagert die Herausforderung der Integration vor allem in die Kompatibilität der Fertigungsprozesse von Mikrostrukturen und Nanomaterialien.

Der folgende Abschnitt soll anhand von Beispielen den Stand der Technik zur Integrationstechnologie und deren Hauptschwierigkeiten konkretisieren.

2.2.1 Integrationsschritte und deren Herausforderungen

Abhängig von den Synthesemethoden ergeben sich unterschiedliche Fragestellungen, denn Mikrostrukturen, Nanomaterialien und die notwendigen prozesstechnischen Schritte bedingen sich gegenseitig, wie dieser Abschnitt zeigen wird. Die aufgeführten Herausforderungen bei unterschiedlichen Mikro-Nano-Integrations-Strategien münden in den Kernfragen zur Integration metallischer vertikal orientierter Drähte.

Die *Klassische Vakuum-Dünnschichttechnik* leitet diese Beschreibung ein. Die Verfahren PVD und CVD sind etabliert zur Integration von Schichten. Sie spielen bei der Mikro-Nano-Integration von 2-D-Nanoobjekten sowie für den Aufbau von Schichtstapeln weniger Nanometer Dicke eine wesentliche Rolle. Die *Separate Synthese und anschließende Integration* ermöglicht es, unabhängig vom Mikrosystem gefertigte Nanomaterialien nach der Synthese ins Mikrosystem zu transferieren. Dieses Vorgehen entkoppelt Synthese und System voneinander, bringt jedoch die Risiken des Transfers mit sich. Die *Vor-Ort-Synthese* vermeidet das Risiko des Transfers, bedingt jedoch

Prozesskompatibilitäten für Mikrostrukturierungsverfahren und Nanomaterialsynthese.

Klassische Vakuum-Dünnschichttechnik

Grundsätzlich lassen sich dünne Schichten gut in Mikrosysteme integrieren, da auf diesem Gebiet viele Jahre Erfahrung mit kommerzieller Nutzung vorliegen. Der thermische Eintrag der Verfahren ist gering, jedoch ergeben sich besondere Herausforderungen bei sehr geringen Schichtdicken:

Schichtfolge Al/Ni bzw. Al/Ti (60 nm/20 nm): Diese Materialkombinationen können so ausgelegt sein, dass sie nach Eintrag einer gewissen Aktivierungsenergie exotherm eine Legierung ausbilden [103–106]. Diese Reaktionswärme kann sehr lokal auftreten, zu hohen Temperaturen von ca. 1200°C führen und dort z. B. zum Aufschmelzen von Loten verwendet werden. Die reproduzierbare Materialmischung für eine stabile Legierungsbildung wird erschwert durch eine tendenziell granulare Abscheidung sowie die Fortpflanzung von Unebenheiten über viele Schichten, vgl. Abbildung 2.2.

Schichtfolge CoFe/Cu (je ca. 2 nm): Ein Multilayer-Schichtstapel kann für magnetoresistive Widerstandsschichten zum Einsatz kommen (siehe [29] Abschn. 4.1.3). Für die industrielle Fertigung mit geringen Prozesszeiten auf Wafer-Level bedarf die Abscheidung der wenige Atomlagen starken, durchgängigen Schichten einer sehr präzisen Prozesskontrolle.

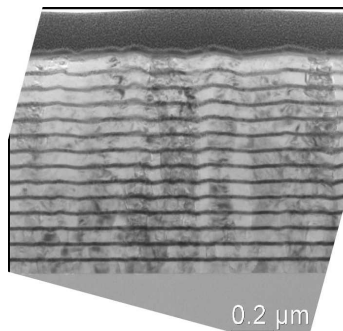


Abbildung 2.2: Al-Ti-Multischichtsystem [103]. Schichtherstellung: ZfM der TU Chemnitz, TEM-Analyse: Fraunhofer IWM Halle.

Separate Synthese und anschließende Integration

Wenn sich Nanomaterialien nicht am Ort der Verwendung im Mikrosystem fertigen lassen (z. B. bei Hochtemperaturprozessen, bei nicht für die Anwendung kompatiblen Nano- oder Mikroordnungen, aus Kostengründen, ...), ist eine spätere Integration nötig. Die folgenden Punkte stehen beispielhaft für die jeweiligen Herangehensweisen:

Polymermatrix-Komposit erstellen und mikrostrukturieren: Bringt man metallische Kohlenstoffnanoröhren (CNT) in einen polymeren Isolator ein, lässt sich prinzipiell über die Konzentration der Kohlenstoffnanoröhren die elektrische Leitfähigkeit von isolierend über halbleitend bis leitend einstellen [107]. Die geringen Durchmesser der CNT stellen in Aussicht, definiert elektrisch leitfähige Materialien herstellen zu können, die optisch transparent sind und sich lithographisch mikrostrukturieren lassen [31]. Für die Integrationstechnik mit Spincoating sind jedoch vor allem die rheologischen Eigenschaften des Komposits bedeutend [32] und nur schwer erreichbar, vgl. Abbildung 2.3.



Abbildung 2.3: Spincoating-Versuche auf 4“-Silizium-Wafern mit Polymermatrix-Kompositen bestehend aus dem Photoresist SU-8 und mehrwandigen CNT (MWCNT): **links** 7 ml statisch applizierter Photolack (SU-8 mit 3 Vol.-% MWCNT): Das Nano-Komposit verfließt nicht und ein klarer Bestandteil läuft aus dem Komposit aus; **rechts** durch Aufschleudern auf dem Substrat verteilte Agglomerate (SU-8 mit 2 Vol.-% MWCNT): inhomogene und unvollständige Nanomaterial-Verteilung [31].

Die Fertigung dieser Nano-Komposite gehört nicht zum Kerngebiet der MNI, beeinflusst jedoch die Integrationsschritte sehr stark und sei daher hier vereinfacht beschrieben. Generell besteht eine Herausforderung darin, dass Nanoobjekte beim Einbringen in eine Materialmatrix, z. B. Wasser oder ein Polymer, nicht agglomerieren bzw. aggregieren dürfen und eine möglichst

homogene Nanoordnung aufweisen. Ansonsten können die erwünschten Effekte des Nano-Komposits unter Umständen nicht zum Tragen kommen. Beeinträchtigen z. B. Partikelagglomerate die Transparenz von Polymeren, kann das Ziel der Transparenz selbst oder einer angepassten Brechzahl nicht erreicht werden. Mit Hilfe von Ultraschall- oder Hochgeschwindigkeits-Rührgeräten erzeugt man mechanische Scherkräfte, die Strukturverbünde aufbrechen [32, 108, 109]. Dabei ist eine hohe Viskosität der Matrix für das Aufbrechen von Agglomeraten förderlich, was den Spielraum für die Fertigung des nanostrukturierten Materials einschränkt.

Einzelmontage von Nanoobjekten: Grundsätzlich lassen sich Nanoobjekte unter Beobachtung im REM mit Nanomanipulatoren hochpräzise in Mikrosysteme montieren. Kritisch sind die schwer steuerbaren Adhäsionskräfte wie Van-der-Waals-Kräfte oder elektrostatische Kräfte. Verfügt man über elektronenstrahlinduzierte Abscheidung (EBID) oder durch fokussierten Ionenstrahl (FIB) gesteuerte Gasphasen-Abscheidung, lassen sich die Nanoobjekte stoffschlüssig zunächst an einen Greifer und dann an das Zielobjekt binden. Dieser Top-Down-Ansatz ist aufwendig und nur dann über Grundlagenuntersuchungen hinaus einsetzbar, wenn automatisierte Handhabung und kurze Prozesszeiten möglich werden [110]. Sonst sind die Prozesslaufzeiten und die Kontamination durch kollateral abgeschiedene Kohlenstoffschichten im REM problematisch hoch.

Neben der Montage im Vakuum sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren zur Applikation im Flüssigkeitsträger in der Literatur zu finden:

Einzelpräparation nach Applikation im Flüssigkeitsträger: Dazu bringt man eine definierte Menge Nanoobjekte in einer Flüssigkeit auf ein Substrat auf und lässt die Flüssigkeit abdampfen. Durch die zufällige Anordnung der nanoskaligen Basisstrukturen müssen diese einzeln im Elektronenmikroskop ausgewählt und im Top-Down-Ansatz präpariert werden z. B. [111–113]. Dabei müssen die Prozessschritte kompatibel zu den Nanoobjekten sein und durch das geringe Nutzen/Aufwand-Verhältnis sind nur Grundlagenuntersuchungen möglich.

Ausrichtung im Feld im Flüssigkeitsträger: Verschiedene externe Felder können genutzt werden, um nanoskalige Basisstrukturen im Bottom-Up-Ansatz kontaktlos mit elektrischen, magnetischen, optisch induzierten oder akustischen Kräften lokal zu konzentrieren [114], vgl. Abbil-

dung 2.4. Anschließend kann man bei Bedarf die Flüssigkeit abdampfen lassen bzw. überkritisch trocknen. Einschränkend auf die Manipulationsgenauigkeit wirkt die Brownsche Bewegung [115]. Weiterhin ist es schwierig eine definierte Anzahl nanoskaliger Basisstrukturen mit reproduzierbaren Eigenschaften zu positionieren [116].

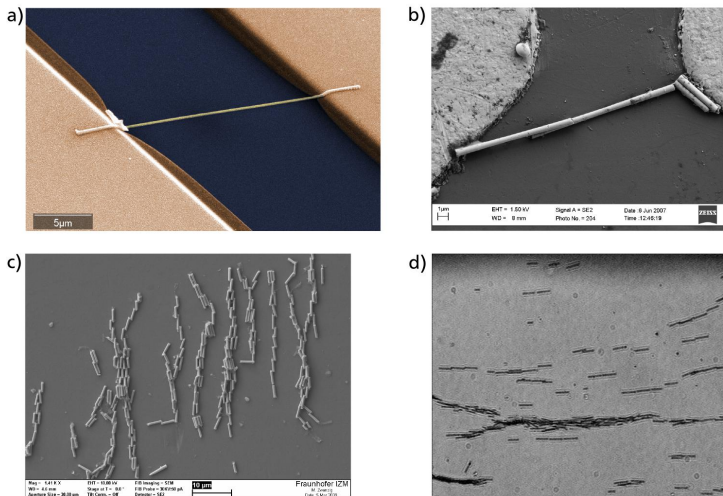


Abbildung 2.4: Metallische Drähte und Stäbe nach der Applikation im Flüssigkeitsträger: **Einzelpreparation:** a) Integrierter Gold-Submikrometer-Draht zwischen Chrom-Gold-Kontaktschichten [112]; **Ausrichtung im Feld** [114]: b) Dielektrophoretisch montierte Gold-Drähte ($0,6 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$) zwischen Mikroelektroden (Abstand: $25 \mu\text{m}$), c) Im magnetischen Feld auf einer Siliziumoberfläche angeordnete Nickel-Stäbe, d) In Knoten eines Ultraschallfeldes zu Ketten konzentrierte Gold-Drähte.

Werden Nanoobjekte separat in oder auf einem Träger hergestellt, kann dieser Träger im Anschluss als Ganzes mit einem mikrostrukturierten Substrat präzise justiert in Kontakt gebracht werden. So können zur Fertigung der Nanoobjekte Verfahren zum Einsatz kommen, die das mikrostrukturierte Substrat schädigen würden, wie z. B. Hochtemperaturprozesse oder rollenbasierte Folienbearbeitungsverfahren:

Nanofasersynthese auf Hochtemperatursubstrat: Stellt man CNT lokalisiert auf einem Hochtemperatursubstrat her, können diese anschließend

als Ganzes – im Batch – auf ein Niedertemperatursubstrat übertragen werden [117]. Dazu sind gut aufeinander abgestimmte Adhäsionskräfte nötig, die durch die feste Verankerung der CNT auf dem Wachstumssubstrat hoch sein müssen und so die Auslegung Prozessfolge erschweren. Hinzu kommt, dass für eine erfolgreiche Strukturübertragung im Batch eine lokalisierte, über das Trägersubstrat homogene und reproduzierbare Synthese der CNT nötig ist.

Nanofasersynthese in Templatefolie: Werden metallische Nanodrähte galvanisch in polymeren Folien mit Nanoporen einzeln oder als Array [118] bzw. Netzwerk [85] gefertigt, lassen sie sich anschließend im polymeren Träger auf das mikrostrukturierte Substrat übertragen [25, 48]. Die Handhabung der polymeren Trägermaterialien birgt ein Zerstörungsrisiko und die Gefahr, durch Dehnung der Folie die Mikroordnung der Nanodrähte ungewollt zu verändern. Eine weitere Herausforderung besteht in der prozesskompatiblen und zuverlässigen elektrischen Kontaktierung der Nanodrähte.

Vor-Ort-Synthese

Die Synthese von Nanomaterialien am Ort der späteren Verwendung erlaubt deren feste Verankerung im Mikrosystem und eliminiert das Risiko der Integration nach der Synthese. Allerdings verlagert sich so die Herausforderung der Integration in die Prozesskompatibilitäten von Mikrostrukturierung und Nanomaterialsynthese und soll hier einleitend für Abschnitt 2.2.2 beschrieben werden.

Es ist ein relativ neuer Ansatz, mikrostrukturierte Katalysatoren, Maskierungen oder Elektroden zur Definition der Mikroordnung für die lokale und gerichtete Synthese der nanoskaligen Basisstrukturen im Mikrosystem zu verwenden [119, 120]. Dabei ergeben sich abhängig von den nanoskaligen Basisstrukturen unterschiedliche Herausforderungen:

CNT: Erzeugt man mikrostrukturierte Katalysatorfelder auf einem Siliziumsubstrat, können darauf senkrecht CNT aufwachsen. So entstehen in der Nanoordnung hochparallele CNT, die in ihrer Mikroordnung zu Blöcken gruppiert sind, vgl. Abbildung 2.5 a). Für das CNT-Wachstum sind sehr reine Katalysatoren nötig, für halbleitende CNT mit höheren Ansprüchen als für leitende CNT. Daher ist die Chemie der Mikrostrukturierungsprozesse für diese Katalysatoren kritisch [87, 117]. Andererseits können hohe Temperaturen bei der CNT-Synthese von

beispielsweise 800°C die auf dem Substrat befindlichen Mikrostrukturen schädigen. Weiterhin ist durch den zufälligen Wachstumsprozess die Abscheidung einer definierten Anzahl CNT nur eingeschränkt möglich. Die Nanoordnung lässt sich lediglich durch die Dichte im Bereich $10^6 - 10^9$ pro mm^2 sowie die stark vom Prozess beeinflusste Parallelität der CNT beschreiben.

Metallische Nanodrähte: Definiert man mikroskalige galvanische Startschichten auf einem Glassubstrat, können in darauf aufgebrachtene Nanoporenfolien senkrecht zum Substrat orientierte Metalldrähte wachsen, vgl. Abbildung 2.5 b). Die Metalldrähte können in ihrer Nanoordnung sehr parallel sein und ihre Mikroordnung ist durch die Array-Form in weiten Bereichen variierbar. Das formgebende Folienmaterial mit Nanoporen zur Abscheidung metallischer Nanodrähte – das Templatmaterial – muss für die Handhabung und Integration ebenso wie für die Integrationsschritte nach der Synthese geeignet sein [121]. Polymeres Material bringt Schwierigkeiten durch leichte Verformbarkeit und geringe Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln mit sich, ebenso bedingen die spröden Eigenschaften sowie die chemische Beständigkeit keramischen Materials prozesstechnische Hürden. Metallische Nanodrähte können nur in zufälliger Nanoordnung mit definierter Parallelität und Dichten im Bereich $10^2 - 10^8$ pro mm^2 gefertigt werden.

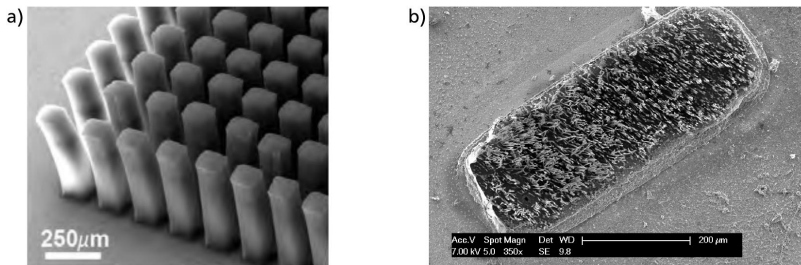


Abbildung 2.5: Vor-Ort-Synthese von Nano- und Mikrofasern: a) CNT-Blöcke auf Silizium-Substrat [87], b) Metalldraht-Array auf Glassubstrat [18].

In allen Ansätzen bedingen sich Prozesse und Materialeigenschaften stark gegenseitig, sodass nur eine interdisziplinäre Bearbeitung der Themen mit materialwissenschaftlicher und mikrosystemtechnischer Sichtweise zielführend sein kann [122]. Die 3-D-Integration von Nanofasern – also deren Ausrichtung aus der Fläche des Mikrosystems hinaus – eröffnet ein großes An-

wendungsfeld für die MNI. Insbesondere die Vor-Ort-Synthese metallischer Drähte bietet vielversprechende Möglichkeiten für gut herstellbare neuartige Mikrosysteme, weshalb der Schwerpunkt dieser Arbeit darauf liegt:

- Durch die niedrigen Prozesstemperaturen der galvanischen Abscheidung können die metallischen Drähte im letzten Schritt auf ein Mikrosystem-Substrat aufgewachsen werden, ohne die darin bzw. darauf befindlichen Strukturen zu schädigen.
- Bei der galvanischen Abscheidung lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand das Material der Drähte und deren Kristallinität ändern.
- Polymeres Templatmaterial ist flexibel und lässt sich daher besser handhaben als anodisch oxidiertes Aluminium. Darüber hinaus ist das Entfernen der verlorenen Form schonender möglich. Daher können Nanodrähte unter Verwendung von polymerem Templatmaterial aus Materialien gefertigt werden, die beim Entfernen des anodisch oxidierten Aluminiums zerstört würden.
- Die mikrotechnischen Prozessschritte auf polymerem Templatmaterial stellen eine Herausforderung bei der Integration dar, jedoch sind viele Erfahrungen mit polymeren Photoresist-Galvanoformen übertragbar.
- Durch enge Kooperation mit dem Fachbereich Materialwissenschaften und dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt können die Template hinsichtlich Porendichte und Porenform in einem weiten Bereich angepasst werden, sodass viele verschiedene Geometrien möglich werden.

Die in diesem Abschnitt einleitend dargestellten Zusammenhänge zur Synthese der Nanofasern vorzugsweise im Mikrosystem sollen im folgenden Unterkapitel detaillierter beschrieben werden.

2.2.2 Synthese hochgeordneter 1-D Nanomaterialien

Verbindet man nanoskalige Basisstrukturen direkt miteinander, sind verschiedene Ausprägungen der Nano- und Mikroordnung möglich. Dies können in der Ebene vernetzte 1-D-Objekte sein, also z. B. miteinander verbundene Calcium- oder Gold-Atomketten auf einem Silizium-Substrat [123].

Dazu dampft man einen Bruchteil einer Monolage auf ein beheiztes, poliertes Silizium-Substrat auf. Dort ordnen sich die Atome beispielsweise zu wabenförmig vernetzten Ketten um.

Spannen die miteinander verbundenen 1-D-Objekte einen Raum auf, spricht man auch von 3-D-Strukturelementen [118, 124]. Dies können parallele vertikal orientierte Nanofasern sein, die an einem oder mehreren Enden miteinander verbunden sind [86, 125, 126]. Stützen sich die Nanofasern entlang ihrer Länge untereinander, ergeben sich dreidimensionale Netzwerke [85] bzw. Verbünde [87], die nicht zwangsläufig an den Enden miteinander verbunden sein müssen. Die folgenden Absätze beschreiben diese Strukturen und deren Fertigungsverfahren anschaulich.

Kohlenstoffnanoröhren (CNT)

An dieser Stelle sei auf die Herstellung von Kohlenstoffnanoröhrchen eingegangen, da sie in der Nanotechnologie und MNI eine bedeutende Rolle spielen. CNT lassen sich generell mit Hilfe von Bogenentladung, Laser-Ablation oder Chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) herstellen. Letzteres Verfahren bietet eine sehr gute Kontrolle der Abscheideparameter und damit ein definiertes Wachstum der CNT. Sie können beispielsweise ohne den Einsatz von Katalysatoren durch Infiltration in porösen Membranen abgeschieden werden, wobei die innere Form der Poren die äußere Form der CNT bestimmt.

Die verlorene Form zur Herstellung von Mikro- und Nanofasern wird in dieser Arbeit je nach Zusammenhang Templat oder Galvanoform genannt.

Ein häufig verwendetes Templatmaterial sind Membranen aus anodisch oxidiertem Aluminium, die auch als AAO-Filter bezeichnet werden. Entsprechend behandelt ist dieses poröse Aluminiumoxid durchdrungen von parallelen Poren in lateral hexagonaler Anordnung, vgl. Abbildung 2.6 a). Dabei sind Porendurchmesser im Nano- und Mikrometerbereich sowie Membrandicken von bis zu 300 µm [127] möglich. Die erhitzte Membran wird von Kohlenwasserstoffen durchströmt, sodass sich darin eine dünne Kohlenstoffschicht abscheidet, vgl. Abbildung 2.6 b). Dies kann beispielsweise bei 750°C, 2-7 mbar und Gasdurchflüssen von 10 sccm Propylen und 10 sccm Argon geschehen [86]. Löst man anschließend das Templatmaterial auf, erhält man hochparallele CNT, die auf der Ober- und der Unterseite durch eine Kohlenstoffschicht miteinander verbunden sind und so eine stabile Einheit bilden, vgl. Abbildung 2.6 c). Als Ätzmedium kann beispielsweise 50%-ige

Flusssäure zum Einsatz kommen, die wegen der Kohlenstoffschicht auf den beiden Stirnflächen bis zu zehn Tage einwirken muss.

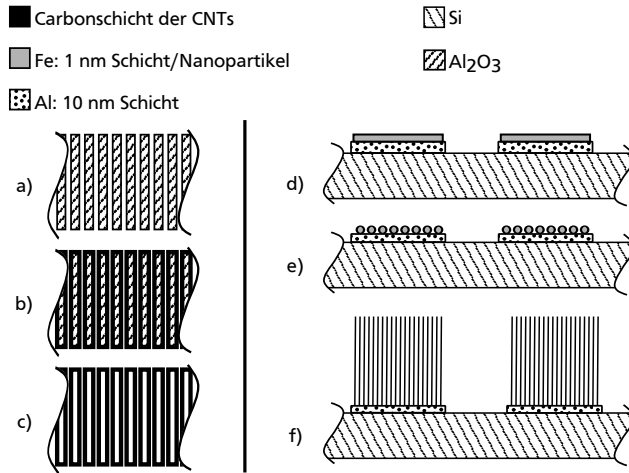


Abbildung 2.6: Fertigungsverfahren für CNT-Verbünde in Querschnittsdarstellung: **links** templatbehaftet ohne Katalysator: a) Anodisch oxidiertes Aluminium-Templat (AAO), b) durch CVD mit Kohlenstoffschicht überzogenes nanoporöses Templat, c) CNT mit Deckschichten oben und unten nachdem das Templat aufgelöst wurde; **rechts** templatfrei mit strukturiertem Katalysator: d) Strukturiert aufgedampfte Katalysatorschichten, e) bei Temperaturanstieg umgelagerte Katalysatorschichten, f) durch CVD senkrecht auf den Katalyschichten aufgewachsener CNT-Verbund.

Alternativ können CNT auch templatfrei auf Katalysatoren abgeschieden werden. Insbesondere die Unterstützung des Wachstums durch Zugabe von Wasser (WCVD) erlaubt die Synthese von 1 mm langen Nanoröhren mit einer Wachstumsrate von 30 bis 40 μm pro Minute [87]. Interessant für die MNI sind mikrostrukturierte katalytisch aktive Flächen, die die Mikroordnung der zu synthetisierenden 3D-Strukturelemente definieren, vgl. Abbildung 2.6 d). Dies kann zum Beispiel eine mit PVD (Aufdampfen) durch eine Schattenmaske aufgebrachte Schichtfolge aus 10 nm Aluminium und 1 nm Eisen sein. Beim Aufheizen auf die Prozesstemperatur für die Gasphasenabscheidung bilden die Eisen- und die Aluminiumschicht eine intermetallische Phase und daraus Nanopartikel, die oben aufliegen, vgl. Abbildung 2.6 e). Deren Position und Abstände untereinander beeinflussen die

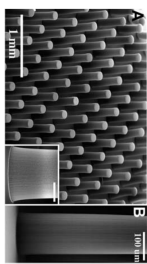
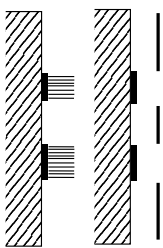
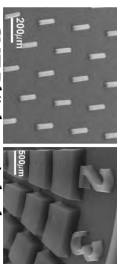
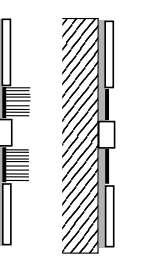
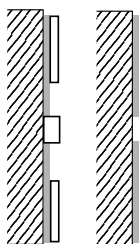
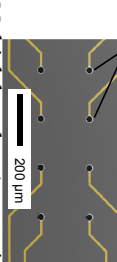
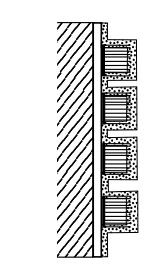
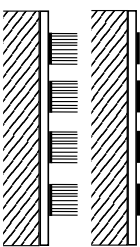
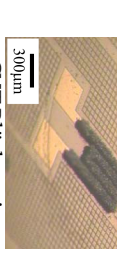
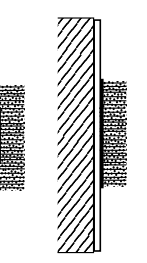
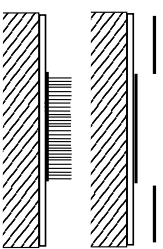
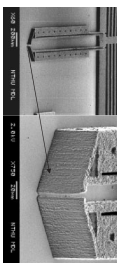
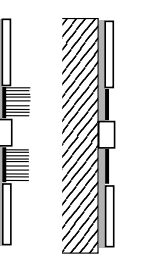
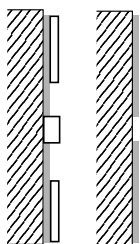
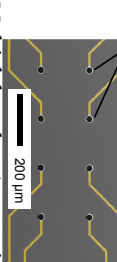
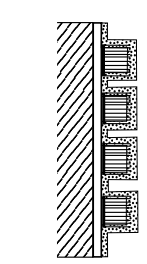
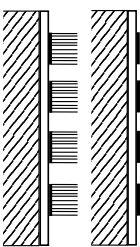
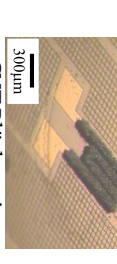
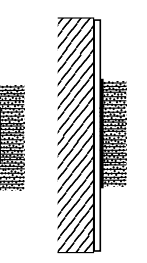
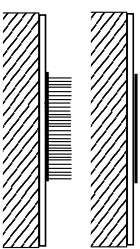
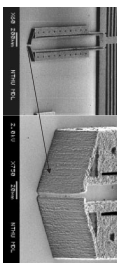
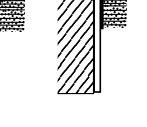
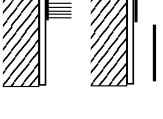
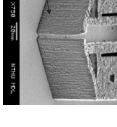
Nanoordnung der CNT. Durch Wechselwirkungen der Nanosynthesestellen untereinander können die CNT zum senkrechten Wachstum auf der Substratoberfläche gebracht werden. Bei 800°C, unter Wasserstoff-, Argon- und Ethylen-Durchfluss sowie einer geringen Menge Wasserdampf (200 ppm) [87] wächst schließlich auf den am Substrat haftenden Katalysatorpartikeln ein Verbund aus parallelen CNT, die sich gegenseitig stützen, vgl. Abbildung 2.6 f). Durch die Wachstumsrate von 30 bis 40 μm pro Minute kann in ca. einer halben Stunde dieser hochparallele Block ohne Templat auf 1 mm Höhe wachsen. Solche Wachstumsprozesse werden im Wesentlichen durch die Dampf-Flüssigkeits-Feststoff-Methode (VLS) beschrieben [91]: Die Precursoren geraten in der Gasphase (Dampf) zum Katalysatorpartikel. Der Partikel liegt bei Wachstumstemperatur geschmolzen vor (Flüssigkeit). Die Precursoren lösen sich im geschmolzenen Partikel und bilden eine Legierung bis Übersättigung eintritt; dann wird Material aus der Legierung ausgeschieden in Form einer Feststoff-Nanofaser (Feststoff). Weitere Details zur Fertigung von CNT sind in [93] vor dem Hintergrund des Einsatzes in Halbleiterbauelementen zusammengefasst.

Tabelle 2.3 beschreibt zusammenfassend verschiedene Ansätze zur templatfreien und mikrostrukturierten Vor-Ort-Synthese hochgeordneter CNT. Die erste Spalte beschreibt das in Abbildung 2.6 d)-f) dargestellte Verfahren in zusammenfassender Weise und zeigt beispielhaft gefertigte Strukturen. Der in der zweiten Spalte beschriebene Ansatz erweitert das Verfahren um mikrostrukturierte Leiterbahnen unter strukturierten Isolatoren und strebt CNT-Bündel als Multikontaktelemente in Bio-MEMS an. Der Ansatz in Spalte 3 geht ebenfalls von mikrostrukturierten Katalysatorschichten aus und schützt die CNT-Blöcke durch eine Ummantelung mit einem Polymer (Parylene). Der Ansatz in Spalte 4 unterscheidet sich durch die CNT-Abscheidung auf einer Opferschicht sowie das vollständige Binden der CNT durch Polymere. So entstehen freitragende CNT-Parylene-Verbünde, die z. B. für Mikrogreifer Anwendung finden können.

Metallische Mikro- und Nanodrähte

In dieser Arbeit von praktischer Bedeutung sind vertikal orientierte metallische Drähte, weshalb an dieser Stelle insbesondere auf deren Fertigung eingegangen sei. Metallische Nanodrähte lassen sich generell galvanisch in Templaten abscheiden, wobei das Templat mit dem Negativ der Drähte – also Kanäle bzw. Poren – die Drahtform definiert. Rein chemische Abscheidungsverfahren kommen seltener zum Einsatz, da elektrochemische Verfahren

Tabelle 2.3: Stand der Technik templatfreier und mikrostrukturierter Vor-Ort-Synthese hochgeordneter CNT.

<div><input checked="" type="checkbox"/> Substrat <input checked="" type="checkbox"/> Al + Fe <input checked="" type="checkbox"/> Au <input type="checkbox"/> SiO₂ <input checked="" type="checkbox"/> Parylene (Poly-p-xylylen) CNT</div>				
<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	
<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	<div><p>ca. 1 mm hohe SWCNT-Blöcke [128]</p><p>CNT-Blöcke mit hohen Aspektverhältnissen und scharfen Kanten [129]</p></div>	

hinsichtlich Prozesssteuerung und reproduzierbarer Ergebnisse bei hohen Aspektverhältnissen überlegen sind. Das Drahtwachstum der hier betrachteten Nano- und Mikro-Drähte beginnt immer am Boden der Struktur, vgl. Abbildung 2.7 a). Schneller sind Verfahren, bei denen die Drähte allseitig im Templat wachsen, vgl. Abbildung 2.7 b) und Anhang C. Dazu sind allerdings Additive nötig, die die Abscheidung am Boden des Templates beschleunigen, an den Seitenwänden inhibieren und an der Oberseite nivellieren sowie für ein porenfreies Wachstum sorgen [133]. Die Additivkonzentrationen mit großem analytischen Aufwand zu überwachen lohnt nur für den industriellen Einsatz, z. B. zur Fertigung von Durchkontaktierungen durch Silizium-Substrate (Through Silicon Via TSV) [134].

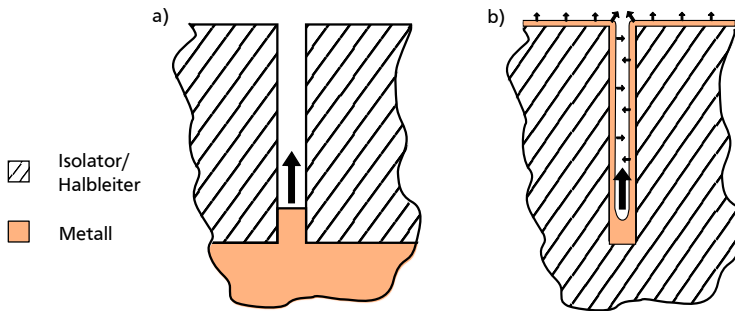


Abbildung 2.7: Drahtwachstum im Templat / in der Galvanoform: a) vom Boden der Struktur aus und mit Kontaktierung von der Unterseite, b) allseitig und mit Kontaktierung von der Oberseite.

Die Template für das galvanische Drahtwachstum werden in dieser Arbeit immer lithographisch definiert. Die Ion Track (IT) Lithographie nutzt aus, dass schwere Ionen beim Passieren durch Materie latente Spuren hinterlassen [135]. Beschießt man ein Polymertemplat, vgl. Abbildung 2.8 a) und e), so werden entlang der Trajektorie Molekülketten aufgebrochen, die sich anschließend aufätzen lassen, vgl. Abbildung 2.8 b) und f). Dieses Verfahren entspricht also dem Verhalten eines Positiv-Photoresists. Kommerziell erhältlich sind Filtermaterialien mit Porendichten im Bereich $10^4 - 10^7$ pro mm^2 . Die Bestrahlung am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung erlaubt das gezielte Einstellen der Poren-Ausrichtung und ihrer Dichte im Bereich von Einzelporen und $10^2 - 10^8$ pro mm^2 beispielsweise mit Au bei 2,19 GeV pro Ion. Die Nanoordnung der parallelen Poren ist dabei immer zu-

fällig. Die lokale Poren-Dichte ist Poisson-verteilt und die Angabe der Dichte ist die beim Experiment gemessene [136, 137].

Darüber hinaus lassen sich durch die Ätzparameter Kanalform und Durchmesser definieren. Zum Beispiel erreicht man mit 6 molarer Natriumhydroxid-Lösung bei 50°C in Polycarbonat zylindrische Poren mit einer Ätzrate von 20 – 30 nm Durchmesser pro min. Konische Aufweitungen der Porenenden lassen sich beispielsweise in Polyimid durch Variation der Ätzlösungen erreichen [138]. Für die Abformung der Drähte ist eine Startschicht nötig, die z. B. rückseitig aufgesputtert und galvanisch verstärkt werden kann, vgl. Abbildung 2.8 c) und g). Die Abscheidung der Drähte erfolgt bevorzugt bei höheren Temperaturen als bei Raumtemperatur, um den diffusiven Stofftransport zu beschleunigen, bei sulfidischem Gold-Elektrolyten etwa bei 50°C. Entfernt man abschließend das Templat, bleiben frei stehende Metalldrähte auf der galvanischen Startschicht verankert, vgl. Abbildung 2.8 d) und h). Das Entfernen des Templats mit einem Lösungsmittel, z. B. Dichlormethan (DCM), bedingt geringen apparativen Aufwand, führt jedoch durch Sticking zum Verkleben von Drähten. Vorteilhafter ist das Sauerstoff-Trockenätzen, wobei jedoch Rückstände entstehen können.

Die hier beschriebene separate Synthese metallischer Drähte kann wie im Abschnitt 2.2.1 angedeutet auch in einer definierten Mikroordnung ablaufen. Dazu schattet man bei der Bestrahlung mit schweren Ionen Bereiche des Templats mit einer Metallschicht ab, siehe Abbildung 2.9 a). Für Au bei 2,19 GeV pro Ion reicht eine 40 µm dicke Nickel- oder Kupfer-Lochmaske sicher aus. Die Prozessschritte in den Abbildungen 2.9 b)-c) gleichen grundsätzlich denen in den Abbildungen 2.8 b)-d). An die Fertigung der nur oben überwachsenen Metalldrähte im Templat schließt sich an, die untere galvanische Startschicht zu entfernen und oben eine aufzutragen, vgl. Abbildung 2.9 d). So können schließlich die Metalldrähte auch an deren Füßen durch Überwachsen miteinander verbunden werden, vgl. Abbildung 2.9 e). Nun folgt der oben als herausfordernd beschriebene Schritt der Integration für die im Templatmaterial befindlichen Nanodrahtarrays auf ein mikrostrukturiertes Substrat, vgl. Abbildung 2.9 f). Der elektrische Kontakt mit den Nanodrahtarrays kann grundsätzlich über Thermokompressionsbonden, Löten oder Kleben aufgebaut werden, z. B. [139, 140]. Allerdings geht von den ersten beiden Verfahren eine hohe mechanische Belastung der Nanodrahtarrays aus. Ebenso ist es denkbar, über EBIB oder FIB induzierte Gasphasenabscheidung zu kontaktieren. Dies bedingt jedoch, dass die

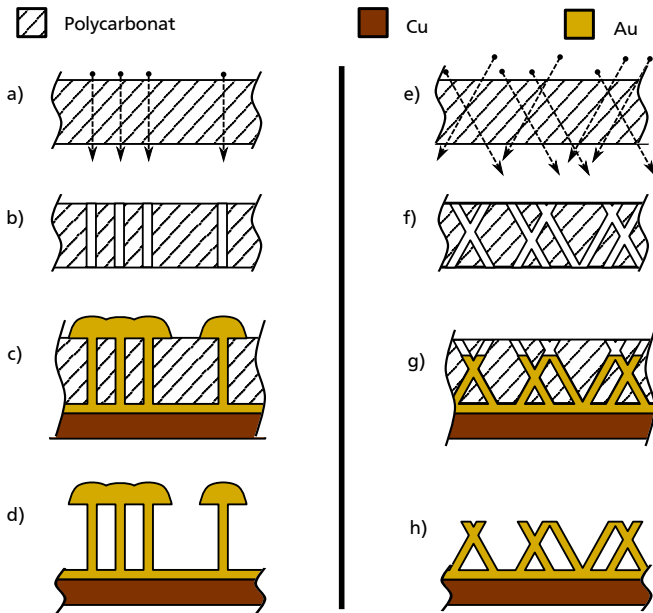


Abbildung 2.8: Fertigungsverfahren für metallische Nanodrahtstrukturen und 3D-Nanodraht-Strukturelemente in Querschnittsdarstellung: **links** Nanodrahtarray und Drähte mit pilzförmiger Überwachung: a) Beschuss des Polycarbonats mit parallelen schweren Ionen, b) Aufätzen der geschädigten Bereiche, c) Galvanisches Abformen der Kanäle im PC und gezieltes Überwachsen, d) Entfernen des PC; **rechts** 3D-Drahtnetzwerk: e) Mehrfacher verkippter Beschuss des PC mit parallelen schweren Ionen, f) Aufätzen der latenten Spuren, g) Galvanisches Abformen der Kanäle im PC mit Abbruch vor dem Überwachsen, h) Entfernen des PC.

Kontaktstelle zwischen dem mikrostrukturierten Substrat und dem Nanodrahtarray im REM zugänglich ist.

Um das große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis der Nanodrähte im Mikrosystem effektiv nutzen zu können, muss abschließend das Templatmaterial entfernt werden, vgl. Abbildung 2.9 g). Dieser Prozessschritt greift die meisten Klebstoffe für die elektrische Kontaktierung an, sodass eine Herausforderung dieses Integrationsansatzes in der Material- und Prozesskombination der Schritte f) und g) liegt.

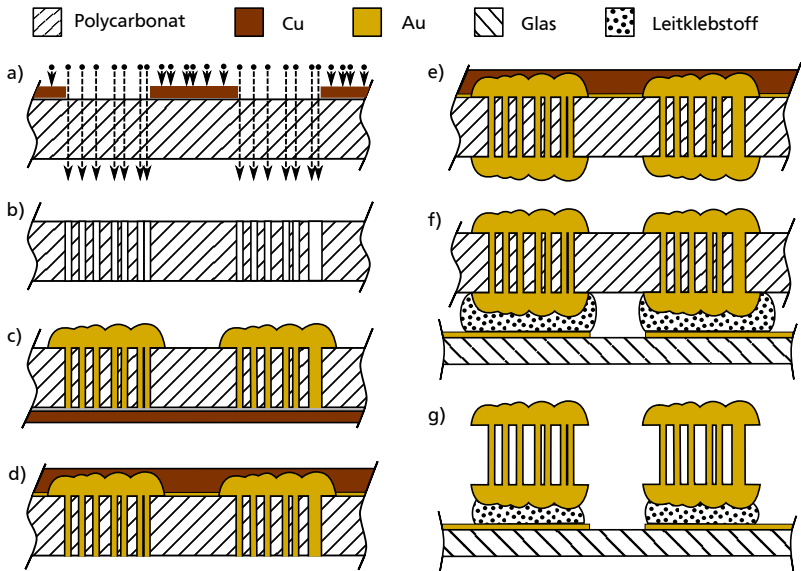


Abbildung 2.9: Separate Synthese für Nanodrahtarrays und anschließende Integration: a) Maskierte Bestrahlung des Templatmaterials, b) Aufätzen der Nanokanäle, c) Unterseite mit Gold besputtern, mit Kupfer galvanisch verstärken, vom Boden beginnend Gold-Drähte aufwachsen und oben überwachsen, sodass sie zusammen hängen, d) Kupferschicht auf der Unterseite entfernen, Oberseite besputtern und galvanisch mit Kupfer verstärken, dünne Goldschicht auf der Unterseite entfernen, e) Gold-Drähte am Boden überwachsen bis sie dort zusammen hängen, f) Kupferschicht auf der Oberseite entfernen, dünne Goldschicht auf der Oberseite entfernen, Nanodrahtarrays im Templatmaterial auf ein mikrostrukturiertes Templat integrieren, g) Entfernen des Polycarbonat-Templatmaterials, vgl. [31, 48, 125].

Die damit verbundenen Risiken lassen sich minimieren, indem man die metallischen Nanofasern direkt dort auf dem mikrostrukturierten Substrat synthetisiert, wo sie im Mikrosystem zum Einsatz kommen. Die Basis des Prozesses bildet ein isolierendes Substrat z. B. aus Glas oder Silizium mit thermischem Oxid und darauf strukturierten Dünnschichtmetallelektroden. Darauf bringt man einen Film aus thermoplastischem Polymer auf, vgl. Abbildung 2.10 a). In den Bereichen, wo metallische Nanodrähte abgeschie-

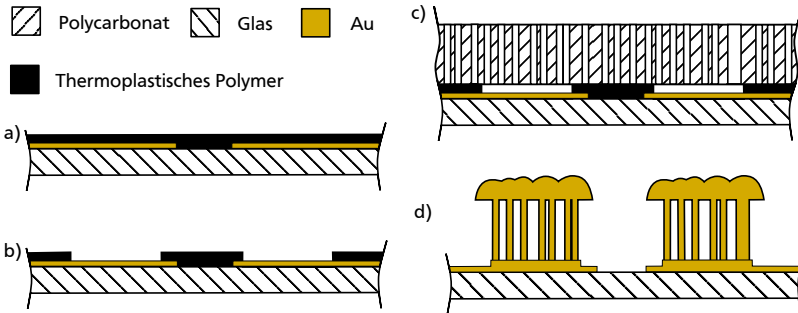


Abbildung 2.10: Vor-Ort-Synthese für Nanodrahtarrays: a) Thermoplastisches Polymer auf Leiterbahnen aufbringen, b) Polymer mikrostrukturieren, c) Nanoporenfolie auflaminieren, d) Nanodrähte abscheiden und überwachsen sowie Nanoporenfolie und thermoplastisches Polymer entfernen, vgl. [121].

den werden sollen, wird das Polymer durch Mikrostrukturierungsverfahren wieder abgetragen, vgl. Abbildung 2.10 b). Im einfachsten Fall ist dies ein Lithographieschritt. Ist das Polymer nicht photostrukturierbar, wird eine Metallschicht darauf aufgebracht und diese Metallschicht wird mikrostrukturiert um als stoffschlüssig integrierte Schattenmaske zu fungieren. In einem anschließenden Trockenätzprozess wird diese Struktur in das Polymer übertragen, sodass die Metallschicht abschließend entfernt werden kann. Um die formgebende Nanoporenfolie auf das Substrat zu integrieren, wird das thermoplastische Polymer erweicht und die Nanoporenfolie wird in einem Laminierungsprozess aufgepresst, vgl. Abbildung 2.10 c). So entsteht eine feste Verbindung, die die Nanoporenfolie für den galvanischen Abscheidungsprozess auf dem Substrat fixiert. Beim abschließenden trockenchemischen Entfernen aller Polymere werden Nano- und Mikrostrukturen schonend freigelegt, vgl. Abbildung 2.10 d).

Tabelle 2.4 beschreibt zusammenfassend verschiedene Ansätze zur mikrostrukturierten Vor-Ort-Synthese hochgeordneter metallischer Nanodrähte. Das Verfahren in der ersten Spalte baut auf das Verfahren nach Abbildung 2.10 auf und kombiniert mehrere auf dem Substrat verankerte Nanodrahtarrays mit einer Brücke. Bringt man auf die Nanoporenfolie eine galvanische Startschicht und eine Galvanoform auf, lässt sich dort eine Brückenstruktur abscheiden. Abschließend sind die Galvanoform, die galvanische Startschicht auf der Nanoporenfolie sowie die Nanoporenfolie zu

entfernen. Eine gefertigte Struktur schließt die Darstellung in dieser Spalte ab. Ein ähnliches, aber nur für große Poren und große laterale Dimensionen geeignetes Verfahren ohne einen Laminierschritt ist in [144] beschrieben.

Die zweite Spalte zeigt die strukturierte Fertigung von Nanoporen in einem Photoresist auf einem Substrat. Abgeschattet durch mikrotechnisch auf dem Photoresist gefertigte Metallstrukturen lassen sich Porenfelder analog zu Abbildung 2.9 a) mit hohen lateralen Positionsgenauigkeiten definieren. Noch präziser ist der lokalisierte Beschuss mit einzelnen schweren Ionen [145]. Allerdings bedingt der einseitige Ätzangriff beim Porenätzen bei langen Poren eine konische Form. Weiterhin ist das Verfahren relativ unflexibel, da vor der Bestrahlung mit Schwerionen bereits die Mikrostruktur festgelegt sein muss und so eine große Abhängigkeit von der Schwerionenbestrahlung besteht. Die Abbildung in dieser Spalte zeigt ein Schema der integrierten Poren sowie eine Aufnahme der Poren auf dem Substrat.

Etwas flexibler ist das in der dritten Spalte dargestellte Verfahren: Der vollflächig wenige Mikrometer dick mit Polycarbonat belackte Wafer wird vollflächig mit Schwerionen bestrahlt. Daran schließt sich ein Tempersschritt nahe der Erweichungstemperatur T_G an, z. B. bei 150°C. Dabei degradiert die latente Spur. Im anschließenden UV-Belichtungsschritt durch eine Maske hindurch werden die belichteten Bereiche so beeinflusst, dass dort im abschließenden Schritt Poren geätzt werden können, während die nicht belichteten Bereiche verschlossen bleiben. Die UV-Dosis muss dafür im richtigen Prozessfenster liegen, denn eine zu hohe Dosis verringert die Ätzbarkeit der Poren wieder

Die vierte Spalte basiert auf einer mit PVD aufgetragenen Aluminium-Schicht, die durch SiO_2 maskiert anodisiert wird [143, 146–148]. So entstehen mikrostrukturiert lokale Nanoporen-Bereiche, die sich anschließend galvanisch auffüllen lassen. Nachteilig an diesem Verfahren sind die Einschränkung der Porenlänge auf ca. 10 μm sowie die Tatsache dass das Aluminium-Oxid-Templat nur nasschemisch entfernt werden kann sowie dass das Templat zum Schutz der Nanodrähte nicht vollständig entfernt werden darf.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verfahren nach Abbildung 2.10 sowie nach Tabelle 2.4 in der ersten Spalte besonders vorteilhaft sind. Die homogenen Schichtdicken des thermoplastischen Polymers und der Nanoporenfolie sowie die Laminiertechnik erlauben den verfahrenstechnisch sehr einfachen Aufbau hochqualitativer Galvanoformen für gleichmäßige Nanodrahtarray-Eigenschaften auf dem gesamten Substrat.

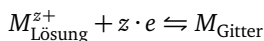
Vorteilhaft an diesem Ansatz ist weiterhin, dass vollflächig nanostrukturier- te Folien Verwendung finden, Justageschritte ausschließlich auf etablierten Lithographieprozessen basieren und jederzeit das Design der Elektroden auf dem Substrat sowie die Form der Nanodrahtarrays geändert werden können.

Mit der in den Verfahren angewandten galvanischen Abscheidung lassen sich bei niedrigen Prozesstemperaturen Nanostrukturen mit wohl definier- ten Eigenschaften [149] vor Ort im Mikrosystem fertigen und so zu MNI- Systemen kombinieren [5, 17, 25, 29, 31, 48, 68, 69, 121]. Für die Integra- tionstechnik ist ein detailliertes Verständnis des Abscheidenvorgangs notwen- dig, weshalb diesem das nächste Unterkapitel gewidmet sein soll.

2.2.3 Galvanische Abscheidung

Dieser Abschnitt beschreibt die Mechanismen der elektrochemischen Ab- scheidung und wie man hohe Stromdichten für polykristalline, spannungs- arme Abscheideergebnisse erreichen kann. Die Abbildungen 2.7 und 2.8 zeigen bereits den Wachstumsablauf und die Formgebung galvanisch ab- geschiedener Drahtstrukturen auf.

In Abbildung 2.11 a) ist eine Elektrolysezelle mit zwei Elektroden darge- stellt, der Arbeitselektroden unten und der Gegenelektrode oben. Zur Ab- scheidung ist eine Potentialdifferenz $u(t) = \varphi_G - \varphi_A > 0\text{V}$ durch eine exter- ne Quelle einzustellen. Dadurch wird die Arbeitselektrode zur Kathode und die positiv geladenen Metallionen aus der Lösung konzentrieren sich dort auf. An der Grenzschicht Elektrode-Elektrolyt stehen sich Elektronen und Metallionen direkt gegenüber und bilden eine elektrolytische Doppelschicht aus (Electric Double Layer, EDL). Die Metallionen $M_{\text{Lösung}}^{z+}$ durchtreten diese Schicht und adsorbieren an der Elektroden-Oberfläche nach der Reduktions- gleichung



Der Stromfluss dieser z Elektronen wird in der chemischen Analytik mit ne- gativem Vorzeichen gekennzeichnet und in der technischen Abscheidung mit positivem Vorzeichen. In dieser Arbeit kommt letztere Konvention des Verbraucherzählpfeilsystems zum Tragen und der Gesamtstrom (technische

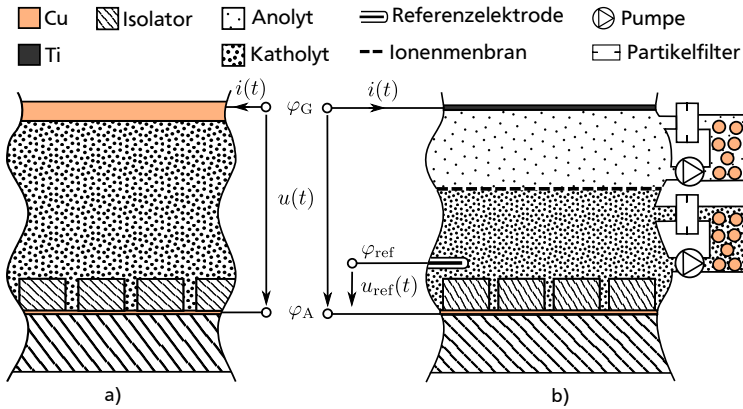


Abbildung 2.11: Elektrolysezellen: a) Zwei-Elektroden-Anordnung, b) Drei-Elektroden-Anordnung mit inerte Gegenelektrode, separater Anreicherung und Filtering sowie getrennten kathodischen und anodischen Elektrolyten.

Stromrichtung) sei bezeichnet mit $i(t)$. Die daraus resultierende Schreibweise für die elementaren Gleichungen der Elektrochemie sind im Anhang in Tabelle C.1 aufgeführt.

Damit ergibt sich die auf der Arbeitselektrode abgeschiedene Stoffmenge nach dem Faraday'schen Gesetz zu

$$m = \frac{M}{zF} \int i(t) dt \quad (2.1)$$

mit

$$M = \text{Molare Masse des abgeschiedenen Metalls} \quad [M] = \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$z = \text{Wertigkeit des Ions im Elektrolyten} \quad [z] = 1$$

$$F = 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}} = \text{Faraday-Konstante} \quad [F] = \frac{\text{A s}}{\text{mol}}$$

Nachteilig an der Anordnung nach Abbildung 2.11 a) ist, dass Widerstandsänderungen in der äußeren Beschaltung und im Elektrolyten Einfluss auf die Abscheidung haben. Der Einsatz einer Konstantstromquelle minimiert diesen Einfluss. Allerdings steht zur Überwachung der Abscheidung nur die

Klemmenspannung zur Verfügung. Damit lässt sich weiterhin nicht zwischen Änderungen des Elektrolyten und der äußeren Beschaltung unterscheiden. Somit lässt sich nicht überwachen, ob das Potential der gewünschten Metallabscheidung erreicht ist oder ob durch die Elektrolyse von Wasser bereits Wasserstoff an der Arbeitselektrode entsteht. Als einziger Parameter lässt sich die Stromdichte einstellen, wozu die aktive Oberfläche der Arbeitselektrode exakt bekannt sein muss, was abhängig von der Arbeitselektrode und deren Rauigkeit häufig nicht gegeben ist.

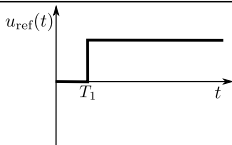
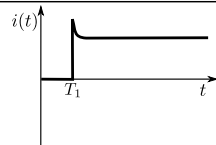
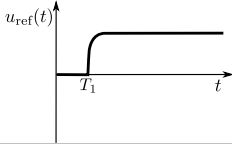
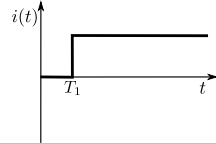
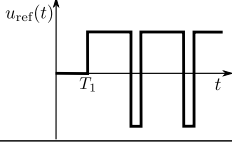
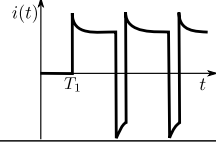
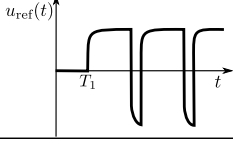
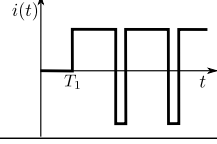
Eine bessere Kontrolle der Verhältnisse erlaubt die in Abbildung 2.11 b) dargestellte Elektrolysezelle mit drei Elektroden. Die zusätzliche stromlose Referenzelektrode stellt das Potential φ_{ref} in Bezug auf einen Punkt nahe der Arbeitselektrode im Elektrolyten bereit. Im *potentiostatischen* Betrieb wird $u(t) = \varphi_G - \varphi_A$ so geregelt, dass $u_{\text{ref}}(t) = \varphi_{\text{ref}} - \varphi_A$ auf definiertem Niveau bleibt – im einfachsten Fall auf statischem Potential. So lässt sich das Potential der gewünschten Metallabscheidung unabhängig von der äußeren Beschaltung einstellen. Konstant eingestellte potentiostatische Abscheideparameter führen bei Änderungen des Elektrolyten – wie z. B. dessen Verarmung – zu veränderter Stromdichte, was zur ständigen Überwachung des Elektrolytzustands dienen kann.

Direkt beim Einschalten der potentiostatischen Abscheidung tritt durch die kapazitive Wirkung der EDL eine Stromerhöhung auf, vgl. Tabelle 2.5 erste Zeile. Diesem Vorgang überlagert und mit etwas größerer Zeitkonstante ist ein weiterer Stromabfall zu beobachten, da durch die Elektrokristallisation in direkter Umgebung der Arbeitselektrode der Elektrolyt verarmt.

Im *galvanostatischen* Betrieb – im einfachsten Fall mit konstanter Bestromung – ist die Abscheiderate weitgehend konstant, wenn die aktiv wirksame Oberfläche gleich bleibt. Wird die Spannung $u_{\text{ref}}(t)$ ständig zur Kontrolle überwacht, lässt sich auch hier das Prozessfenster der Abscheidebedingungen kontrollieren. Umgekehrt zur Stromüberhöhung beim Einschalten der potentiostatischen Abscheidung bewirken die gleichen Mechanismen beim Einschalten der galvanostatischen Abscheidung ein Abflachen des Spannungsverlaufs, vgl. Tabelle 2.5 zweite Zeile.

In Abbildung 2.11 b) kommt eine inerte anstelle einer löslichen Anode zum Einsatz. Somit ändern sich die geometrischen Verhältnisse an der Gegenelektrode während der Abscheidung nicht. Zum metallischen Anreichern des Elektrolyten können Metallstückchen – Pellets oder Clippings – örtlich getrennt umspült werden. Mit einer anschließenden Filterung lassen

Tabelle 2.5: Übersicht über elektrochemische Abscheidemethoden.

Abscheidemethode	Spannungsverlauf	Stromverlauf
Potentiostatische Abscheidung		
Galvanostatische Abscheidung		
Potentialgeführte Umkehrpulsabscheidung		
Stromgeführte Umkehrpulsabscheidung		

sich Nebenprodukte der Anreicherung – wie z. B. Anodenschlamm – aus dem Elektrolyten entfernen. Vorteilhaft für diese Anordnung ist der Einsatz eines Redoxmediators, wie z. B. des Redoxpaares $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ im sauren Kupferelektrolyten, vgl. Anhang C. Die Verwendung von Additiven im kathodischen Elektrolyten erweitert die Möglichkeiten der Einflussnahme auf die Schichtqualität. Die meisten Additive werden oxidativ zersetzt, sodass sich deren Konzentration über die Zeit ändert. Sind kathodischer und anodischer Elektrolyt – Katholyt und Anolyt – durch eine Kationenmembran voneinander getrennt, erhöht sich die Standzeit der Additive. Denn so gelangen bei fast ungehinderter Kationenbewegung die wesentlich größeren Additiv-Moleküle kaum zur Gegenelektrode, wo sie zersetzt würden. Diese und weitere Maßnahmen zum Umgang mit Additiven sind in Anhang C beschrieben.

Wenn die Metallionen an der Kathode kristallisieren, sinkt dort deren Konzentration im Elektrolyten. Es entsteht also eine Zone verringerter Ionenkonzentration in direkter Nachbarschaft zur Arbeitselektrode, die Nernst'sche

Diffusionsschicht mit der Ausdehnung $\delta_N \approx 1..500 \mu\text{m}$. Damit ist sie wesentlich stärker räumlich ausgeprägt als die direkt an der Grenzfläche Elektrode-Elektrolyt vorliegende elektrolytische Doppelschicht mit ca. 0,1 nm, (vgl. [150] Abschn. 5.3.1). Ist die Ausdehnung der Verarmungszone kleiner als die Rautiefe der Arbeitselektrode, kristallisiert das Metall homogen und man spricht vom Makroprofil, vgl. Abbildung 2.12 a). Ist sie größer, führt eine Feldüberhöhung an den hervorstehenden Strukturen dort zu einer größeren Abscheiderate und man spricht vom Mikroprofil, vgl. Abbildung 2.12 b). Letzterer Effekt ist also selbst verstärkend und kann zu pulverartigen Abscheidungen führen.

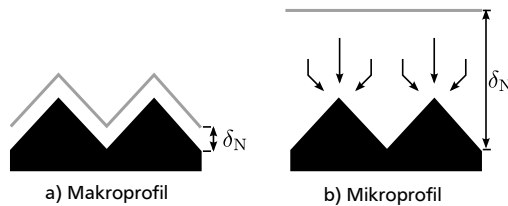


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung der Nernst'schen Diffusionsschicht mit der Dicke δ_N im Verhältnis zum Oberflächenprofil der Arbeitselektrode [151].

Schaltet man die externe Quelle periodisch zwischenzeitlich aus, verringert sich die Verarmungszone in den Abscheidepausen und man spricht von *Pulsabscheidung*. In den Abscheidephasen kann kurzzeitig mit hohen Stromdichten abgeschieden werden, sodass den Ionen „keine Zeit zum Bilden großer Kristalle“ bleibt. Es können polykristalline, spannungsarme Schichten abgeschieden werden, wobei sich durch die Abscheidepausen die Gesamtprozesszeit gegenüber der statischen Abscheidung in der Regel verlängert. Polt man die Quelle direkt nach jedem Abscheidepuls kurzzeitig um, spricht man von *Umkehrpulsabscheidung*. Dabei kehren sich für einen kurzen Moment die Funktionen der beiden Elektroden um und zunächst treten kapazitive Umladevorgänge auf. Kommen Additive zum Einsatz, erhöht sich anfangs deren Konzentration an der Arbeitselektrode ähnlich der anaphoretischen Lackabscheidung. Anschließend werden auch ohne Additive hervorstehende Strukturen von der Arbeitselektrode abgetragen. Diese Umkehrpulsabscheidung wirkt planarisierend und verstärkt die Wirkung der Additive, vgl. Tabelle 2.5 dritte und vierte Zeile. Die Höhe des Abscheidepulses ist durch das Potential begrenzt, ab dem Wasser elektrolysiert. Die Höhe des

Abtragspulses kann ohne Gasbildung an den Elektroden betragsmäßig wesentlich höher gewählt werden. Vor allem bei kurzzeitigen hohen Pulsen ist der kapazitive Effekt der elektrolytischen Doppelschicht von Bedeutung und überlagert die elektrolytische Abscheidung bzw. den Abtrag. Die *potentialgeführte Umkehrpulsabscheidung* stellt dabei die Abscheidebedingungen an der Arbeitselektrode exakter ein. So werden bei Unsicherheiten in der Elektrodenfläche höhere kurzzeitige Stromdichten für polykristalline Abscheidungen möglich. Es werden aber auch niedrige Stromdichten möglich, die zur monokristallinen Abscheidung nötig sind [152]. Bei der Abscheidung metalischer Mehrschichtsysteme aus einer einzigen Lösung ist die Trennung der Schichten schärfer als bei stromgeführten Verfahren [153].

Die *Nernst-Planck-Gleichung* beschreibt den Ionenstrom im Elektrolyten hervorgerufen durch Migration, Diffusion und Konvektion, was sich durch einen Stromfluss ausdrücken lässt. Die Kennzeichnung der Variablen folgt [154], zur einheitlichen Kennzeichnung des Stroms innerhalb dieser Arbeit sei das Verbraucherzählpfeilsystem für den Grenzstrom i_{lim} gewählt:

$$i_{\text{lim}} = zF\vec{A}\vec{N} = zF\vec{A} \left(\underbrace{-zuFc\nabla\varphi}_{\text{Migration}} \underbrace{-D\nabla c}_{\text{Diffusion}} \underbrace{+c\vec{v}}_{\text{Konvektion}} \right) \quad (2.2)$$

mit

\vec{A} = durchströmte Fläche

$$[\vec{A}] = \text{m}^2$$

\vec{N} = Teilchenstromdichte

$$[\vec{N}] = \frac{\text{mol}}{\text{s m}^2}$$

c = Konzentration der Ionen

$$[c] = \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

φ = elektrisches Potential in V

$$[\varphi] = \frac{\text{kg m}^2}{\text{A s}^3}$$

u = Mobilität der Ionen

$$[u] = \text{mol s}$$

D = Diffusionskoeffizient

$$[D] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

\vec{v} = Ionengeschwindigkeit im bewegten Fluid

$$[\vec{v}] = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Von praktischer Bedeutung ist in vielen Fällen die Grenzstromdichte $j_{\text{lim}} = i_{\text{lim}}/A$ als Maß für die höchste Stromdichte zur fehlerarmen Schichtabscheidung. Bei größeren Stromdichten überschreitet φ_{ref} häufig das Potential ab

dem Wasser zersetzt wird und neben den Metallionen konzentriert sich an der Arbeitselektrode auch Wasserstoff auf. Dies kann zu molekular eingelagertem Wasserstoff ebenso wie zu Gaseinschlüssen und damit zu Schichtqualitätsänderungen führen.

In Elektrolyten zur galvanischen Abscheidung kommt elektrochemisch inaktives Leitsalz im Einsatz, das in der Regel den Stromtransport vollständig übernimmt. Daher kann für die folgende Betrachtung der Migrations-Term ignoriert werden. Der konvektive Anteil des Stofftransports kommt durch natürliche Konvektion – bedingt durch Dichte- und Temperaturunterschiede – sowie erzwungene Konvektion – erzeugt durch künstliche Badbewegung bzw. Bewegung der Arbeitselektrode – zustande. Dieser Typ des Stofftransports spielt bei flächiger Abscheidung eine wesentliche Rolle, ist jedoch bei der Abscheidung in Kavitäten auf zurückgesetzten Mikroelektroden wie in Abbildung 2.7 a) oder 2.13 von untergeordneter Bedeutung, wenn man keinen speziellen apparativen Aufwand zur schallunterstützten erzwungenen Konvektion betreibt [155]. Der Einsatz von Megaschall mit der Kreisfrequenz $\omega = 1 \text{ MHz} \cdot 2\pi$ und einer wässrigen Lösung mit der dynamischen Viskosität $\mu = 10^{-3} \text{ Pa s}$ sowie einer Dichte $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ist auch nur unter der folgenden Bedingung von wesentlichem Einfluss auf die Flüssigkeitsbewegung [156]:

$$2r \gg \sqrt{\frac{2\mu}{\omega\rho}} = 564 \text{ nm} \quad (2.3)$$

mit

r = Öffnungsradius, vgl. Abbildung 2.13

Darüber hinaus ist die Peclet-Zahl – der konvektive Stofftransport durch das akustische Feld im Verhältnis zum diffusiven Stofftransport – bei Metallionen um ca. zwei Größenordnungen geringer als bei Polymerfragmenten wie sie in der Photolithographie bei der Entwicklung auftreten [156]. Selbst wenn der Einsatz von Megaschallfeldern den Entwicklungsprozess beschleunigt, ist dies bei der galvanischen Abscheidung nicht unbedingt der Fall.

Bestimmend für die folgende Betrachtung ist allein der diffusive Stofftransport, sodass sich der Ausdruck für den maximalen Strom zur Metallabscheidung nach Gleichung (2.2) vereinfacht zu

$$i_{\text{lim}} = -zF\vec{A}(D\nabla c) \quad (2.4)$$

Der Gradient der Konzentration ist von niedriger Ionenkonzentration direkt an der Arbeitselektrode zu hoher Ionenkonzentrationen im Volumen des Elektrolyten orientiert, sodass sich durch das negative Vorzeichen ein positiver technischer Strom von der Gegen- zur Arbeitselektrode ergibt. Zur Identifikation der Einflussgrößen kann der Diffusionskoeffizient mit Hilfe der Stokes-Einstein-Gleichung ausgedrückt werden:

$$D = \frac{R_0 T}{6\pi\mu r} \quad (2.5)$$

mit

$$R_0 = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} = \text{universelle Gaskonstante} \quad [R_0] = \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

$$T = \text{Temperatur} \quad [T] = \text{K}$$

$$\mu = \text{dynamische Viskosität} \quad [\mu] = \text{Pa s}$$

$$r = \text{hydrodynamischer Radius des hydratisierten Teilchens} \quad [r] = \text{m}$$

Bei gegebener chemischer Zusammensetzung des Elektrolyten lässt sich also der Diffusionsgrenzstrom im Wesentlichen durch die Temperatur beeinflussen.

Um zu einem geometrieabhängigen Ausdruck für den Grenzstrom zu gelangen, ist eine genauere Betrachtung des Drahtwachstums im Templat und darüber hinaus nötig. Abbildung 2.13 stellt von links nach rechts die Abfolge der Drahtwachstums-Etappen dar.

Im Fall nach Abbildung 2.13 a) beeinflusst die lineare Diffusion der Metalionen von der oberen Öffnung des vertikalen Kanals zur Mikroelektrode am

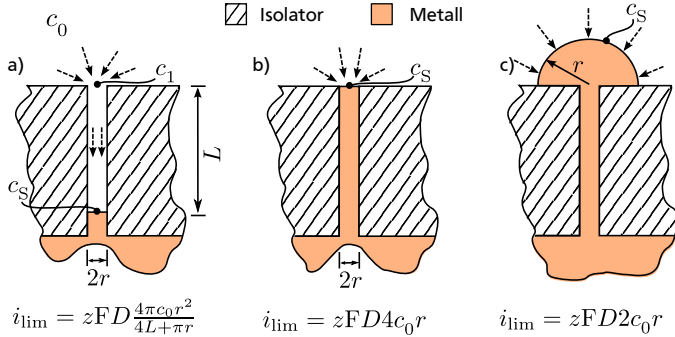


Abbildung 2.13: Drahtwachstum in der Galvanoform beginnend bei a) – der zurückgesetzten Mikroelektrode – über b) – der planar oben abgeschlossenen Mikroelektrode – bis zu c) – der halbsphärischen Elektrode. Die Konzentration c_0 bezeichnet den angereicherten Elektrolyten, c_1 den an der Öffnung des vertikalen Kanals im Fall a) und c_S den an der gerade beschichteten Elektrodenoberfläche mit $c_S = 0$ für $i = i_{\text{lim}}$.

Boden der Kavität den maximalen Strom der elektrolytischen Abscheidung. Somit folgt aus Gleichung (2.4):

$$i_{\text{lim}} = zF\pi r^2 D \frac{c_1}{L} \quad (2.6)$$

mit

$$A = \pi r^2 = \text{Fläche der Mikroelektrode} \quad [A] = \text{m}^2$$

$$L = \text{Länge des vertikalen Kanals} \quad [L] = \text{m}$$

$$c_1 = \text{Konzentration an der oberen Öffnung des vertikalen Kanals} \quad [c_1] = \text{mol/m}^3$$

$$c_S = 0 = \text{Konzentration an der Elektrodenoberfl.} \quad [c_S] = \text{mol/m}^3$$

Die planare Diffusion beschreibt den Ionentransport vom angereicherten Elektrolyten (c_0) zur oberen Öffnung des vertikalen Kanals (c_1) und ist aufwändig in [157] und [158] ausgeführt. Mit der Konzentrationsdifferenz $c_0 - c_1$ folgt für diesen Vorgang:

$$i_{\text{lim}} = zFD4(c_0 - c_1)r. \quad (2.7)$$

Gleichsetzen der Gleichungen (2.6) und (2.7), auflösen nach der Konzentration c_1 sowie einsetzen in Gleichung (2.6) führt zum Ergebnis für Fall a):

$$i_{\text{lim}} = zFD \frac{4\pi c_0 r^2}{4L + \pi r} \quad (2.8)$$

Im Fall nach Abbildung 2.13 b) beträgt die Konzentrationsdifferenz für die planare Diffusion $c_0 - c_s = c_0$ und somit folgt nach Gleichung (2.7) als Ergebnis für Fall b):

$$i_{\text{lim}} = zFD4c_0r \quad (2.9)$$

Der Fall nach Abbildung 2.13 c) ist aufwändiger zu beschreiben und ergibt sich nach [157] und [158] zu:

$$i_{\text{lim}} = zFD2c_0r \quad (2.10)$$

Nach dieser Übersicht über die Fertigung von MNI-Systemen mit dem Schwerpunkt auf der galvanischen Abscheidung sollen die folgenden Unterkapitel den Bogen der Anwendungen von Sensorik und Aktorik über Elektronik und Optik bis hin zu Chemie/Energie spannen.

2.3 Anwendungen

Die Forschungsergebnisse aus den Gebieten Nanotechnologie und Mikrosystemtechnik haben viele Anwendungsszenarien sowie industriell umgesetzte Anwendungen hervorgebracht. Zu Anwendungen von CNT bestehen mehrere Übersichts-Veröffentlichungen, beispielsweise [159–166], zur Mikro-Nano-Integration allgemein [27, 167–172] sowie zur MNI von Porenmaterial [142, 173] und metallischer Nanodrähte im Speziellen [91, 174] vergleichsweise wenige. Die folgenden Unterkapitel vermitteln jeweils tabellarisch einen Eindruck der Anwendungsbreite von 0-D bis 3-D Nanomaterialien und beschreiben beispielhaft einige dieser Anwendungen im Detail.

Jede reale Mikrostruktur weist eine nanostrukturierte Oberfläche auf, zu meist charakterisiert durch Rauigkeit und Porosität. Von Anwendungen der Mikro-Nano-Integration soll hier allerdings erst gesprochen werden, wenn

diese Nanostruktur definiert eingestellt und funktionsbestimmend ist. Dies ist vor allem der Fall, wenn große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisse vorliegen, sehr geringe Abmessungen in mehreren Raumrichtungen bestehen bzw. die kritische Länge eines physikalischen Vorgangs unterschritten wird. Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, bieten vor allem auf festen Substraten abgeschiedene und damit dort verankerte Nanofasern herausragende Materialeigenschaften und gute Integrierbarkeit, weshalb ein Fokus dieser Arbeit auf deren Anwendung liegen soll.

Marktrecherchen zur Mikrosystemtechnik prognostizieren ein stetiges Wachstum des gesamten MEMS-Marktes und weisen dabei den Anteil der Sensorik mit etwas mehr als der Hälfte aus [175, 176]. Für den Zeitraum 2012–2016 liege das jährliche Wachstum des zivilen Sensorikmarkts bei prognostizierten 9% [177], wobei der Einsatz von Mikro-Nano-Integration in dieser Studie nicht ausgewiesen ist. Eine weitere Marktstudie zur Nanotechnologie schließt unter dem Titel „Nanointermediates“ Produkte mit Mikrostrukturen und Nanomaterialien zusammen [122]; dies sind Sensoren, Aktoren, optische Komponenten und Elektronik aber auch Beschichtungen und Textilien mit inkorporierten Nanomaterialien. Dieses Marktsegment solle bis 2014 ebenfalls stark wachsen. Deutsche Aktivitäten im Sektor Mikro-Nano-Integration sind darüber hinaus in zwei Studien dargestellt [29, 178].

2.3.1 Sensorik

Die besonderen Eigenschaften der Nanoobjekte begründen sich auf deren geringen Abmessungen. Herausragend sind diese Eigenschaften, wenn die Nanoobjekte einzeln oder z. B. als mikrostrukturierte Bündel zum Einsatz kommen. Daher können die Nanomaterialien vor allem dort vorteilhaft wirken, wo energetisch sehr geringe elektronische, mechanische bzw. optische Effekte zum Einsatz kommen. Dies ist in der Sensorik der Fall, weshalb dieses Anwendungsgebiet der Mikro-Nano-Integration dominiert, vgl. Tabelle 2.6. Vorteilhaft für das Anwendungsgebiet Sensorik kommt hinzu, dass durch die zentrale Rolle eines Sensors in vielen Anwendungen verhältnismäßig hohe Fertigungskosten betriebswirtschaftlich darstellbar sind.

In der Sensorik kann man die Kräfte auf einzelne Nanofasern oder auf mikrostrukturierte Bündel gut dosieren und benötigt oft auch nur geringe aktorische Kräfte. Elektronische Effekte, die z. B. durch Einwirkungen von Gasen auf die halbleitenden Eigenschaften von CNT entstehen, lassen sich

Tabelle 2.6: Anwendungen der Mikro-Nano-Integration: Sensorik.

Nanomater.	Sensorik
	MNI = Nanomaterial mit μm -Außenabmessungen, N = einzelne Nanoobjekte (der Nanotechnologie zuzuzählen), Mi = wie MNI jedoch Objekte $\gg 100\text{ nm}$; Material („M=“): Met = Metalle, Pol = Polymere, Ox = Oxide, Si = Si und Si-Verbindungen, Gla = Glase, C = CNT und Kohlenstoff-Materialien
0-D	<ul style="list-style-type: none"> Auslenkungsmessung mit piezoresistivem Widerstand in polykristallinen Diamant-Biegezugungen [179] (MNI M=C) Schneller IR-Emitter für Gassensoren [180, 181] (MNI M=C)
1-D	<ul style="list-style-type: none"> Sensoren für mechanische Größen (Druck, Kraft, Drehmoment) basierend auf Perkolation [165, 182] (MNI M=C) Druck-, Temperatur-, Beschleunigungs-Multisensor [131] (MNI M=C) Beschleunigungssensor mit flexiblen CNT [183] (MNI M=C) Ultraschallsensor für mechanischen Zustand poröser Werkstoffe [184] (MNI M=C) Vibrierende Nanofaser als Massensensor [79, 80, 185–189] (N M=Si) Rastersondenmikroskopie (SPM)-Spitzen für Proben mit hohem Aspektverhältnis [159, 161, 190, 191] (N M=C) Biomimetischer Sensor mit vertikalen Härchen [192] (MNI M=Si) [192–196] (Mi M=Met,Pol,Si) Schneller IR-Emitter für Öl-Sensoren und verbesserte IR-Transmission in Küvette [197, 198] (MNI M=Si,Met,Ox) Hochdruckfester Ölsensor mit Niedertemperatur-Fügeverbindung [198, 199] (MNI M=Gla) Thermoelektrischer Infrarot (IR)-Sensor [112, 200–203] (MNI M=Met) Gasflusssensor mit hoher spezifischer Oberfläche [25, 48, 68] (MNI M=Met) Taupunktsensor mit Nanogras [204, 205] (MNI M=Si) Gassensor mit geringer Zeitkonstante [206] (N M=Ox) Gassensor mit Widerstandsänderung durch Absorption von Gasmolekülen [86, 207, 208] (MNI M=C) Luftdrucksensor durch O_2-Anlagerung [209] (MNI M=Ox) GMR-Sensor aus Nanodrähten [210] (MNI M=Met)
2-D	<ul style="list-style-type: none"> Flächige GMR-Sensoren [211–213] (MNI M=Met)
3-D	<ul style="list-style-type: none"> Diffraktive Bildvorverarbeitung für 3-D-Bildsensor [214, 215] (MNI M=Pol) Einsatz des APSM-Prozesses für Membranen in MEMS [216] (MNI M=Si) Gassensor mit mesoporösem Metalloxid [29, 217] (Mi M=Oxid)

Tabelle 2.7: Matrix möglicher Wandlungsmechanismen in sensorischen Mikrosystemen basierend auf funktionellen CNT, nach [163].

		← Ausgang ⇒		
		Elektrisch	Mechanisch	Optisch
⇔ Eingang ⇔	Elektrisch	Veränderung des Fermi-Niveaus, z. B. [218] <ul style="list-style-type: none"> • SWCNT Feldeffekt-Transistor [219–221] 	Inverser piezoelektrischer Effekt [222] <ul style="list-style-type: none"> • Relais [223, 224] • Pinzette [225] • Künstliche Muskeln [226] • Rotor [227, 228] • Speicherzelle [227] 	Photonenemission [229] <ul style="list-style-type: none"> • Lokale Infrarot (IR) -Emission [229] • Helle IR-Emission durch el. induzierte Anregung [230]
	Mechanisch	Piezoresistiver Effekt [231], Öffnung der Band-Lücke [232, 233], Feldgesteuertes Tunneln [234] <ul style="list-style-type: none"> • Drucksensor [235, 236] • Kraftsensor [237] • Auslenkungssensor [238] • Massensensor [239] • Tunnelgestütztes Elektronenpendel [240] 	<div style="text-align: center;"> <p>Wandlungsmechanismen an einer Kohlenstoffnanoröhre (CNT)</p> </div>	
	Optisch	Photonenabsorption <ul style="list-style-type: none"> • CNT Optoelektronik [241] • IR-Sensor [242] 		

gut elektronisch verstärken. Ebenso reichen geringe optische Ausgangsleistungen zur Messung aus, da die Mikro-Nano-Integration optische Effekte sehr gezielt nutzt. Tabelle 2.7 fasst diese Wandlungsmechanismen in CNT vor dem Hintergrund der Anwendung in der Sensorik zusammen und verdeutlicht die Multifunktionalitäten der Sensorik. Darüber hinaus behandelt [243] das mechanische Verhalten von CNT umfassend vor dem Hintergrund des Einsatzes in Nanosensoren. Neben CNT sind auch metallische Drähte be-

sonders zum Einsatz in Sensoren geeignet, weshalb der Fokus der folgenden Beschreibung auf deren Einsatz liegen soll.

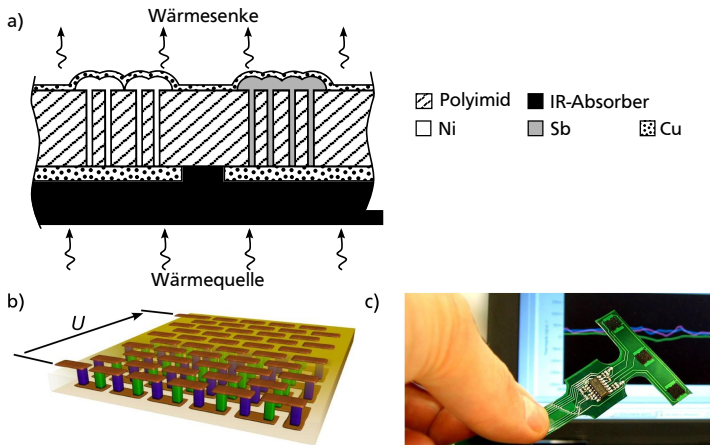


Abbildung 2.14: Thermoelemente mit Nanodrahtarrays in Polyimid-Membran: a) Schematischer Aufbau mit alternierenden Materialien vgl. [244], b) Schematische Darstellung der Reihenschaltung von Nanodrahtarrays aus alternierenden Materialien zu einem Thermoelemente-Modul [245], c) Anwendung von drei Thermoelemente-Modulen auf einer flexiblen Leiterbahn [245].

Die geringe Grundfläche – der Footprint – der Nanodrähte ist geeignet, um Thermoelemente mit geringen Abmessungen aufzubauen. Um mit einem Thermoelement aus einer Temperaturdifferenz eine elektrische Spannung zu erzeugen, sind zwei Strukturen aus unterschiedlichen Materialien notwendig, vgl. Abbildung 2.14 a).

Die Strukturen sind an einem Ende elektrisch miteinander zu verbinden und dort auf eine Temperatur zu bringen. Bringt man das andere Ende der beiden Strukturen auf eine andere Temperatur, liegt dort zwischen den beiden Strukturen eine Spannung an. Diese Strukturen können ähnlich wie in Abbildung 2.10 dargestellt Nanodrahtarrays sein, jedoch aus alternierenden Materialien. Kombiniert man sie zu Serienschaltungen ähnlich wie in Tabelle 2.4 in der zweiten Spalte dargestellt, entstehen Nanodraht-Thermoelemente.

Die Veröffentlichung [246] und die Patentfamilie [247] beschreiben ein Verfahren zum Aufbau solcher Thermoelemente in flexiblen Polyimid-Membranen. Dabei besteht eines der Nanodrahtarrays aus Antimon (Sb) und eines aus Nickel (Ni). Die Serienschaltung von z. B. 45 Nanodrahtarray-Thermoelementen erhöht die Thermospannung von z. B. $24\text{ }\mu\text{V/K}$ pro Thermoelement auf $1,1\text{ mV/K}$ für das Thermoelemente-Modul, vgl. Abbildung 2.14 b). Durch den geringen Querschnitt der Nanodrähte beträgt die Wärmeleitfähigkeit der Nanodrahtarrays entlang der Nanofaser-Hauptachse ähnlich der durch die Polyimid-Membran hindurch etwa $0,14\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, für die thermische Leitfähigkeit von Nanodrähten vgl. auch [112, 202, 248]).

Somit werden technisch einsetzbare Module möglich. Im Unterschied zu klassischen Infrarot-Sensoren (IR-Sensoren), die Temperaturdifferenzen in der Bauteil-Ebene messen [249], erlaubt dieser Aufbau die direkte Messung des Temperaturflusses durch die dünne Polyimid-Membran mit Nanodrahtarrays hindurch. Darauf aufbauend bietet die Firma Jondetech [245, 250] flexible IR-Detektoren mit besonders geringer Dicke und vergleichsweise geringen Außenabmessungen an (Abbildung 2.14 c). Sie stützt sich dabei auf umfangreiche Forschungsergebnisse der Firmengründer [120, 141, 174, 244, 251–256].

Das große Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis der Nanodrähte ist geeignet, um mit geringer Zeitkonstante den Zustand umgebender Gase zu detektieren [206]. Die Oberfläche eines metallischen Nanodrahtarrays ist wesentlich größer als z. B. die eines Bond-Drahtes mit den gleichen Außenabmessungen. Die Temperaturänderungen des umgebenden Gases können also deutlich schneller auf das Metall übertragen werden. Somit ist auch die Widerstandsänderung des gesamten Leiters schneller elektrisch auswertbar.

Für den Aufbau eines Gasflusssensors mit Nanodrahtarrays ist die Integration mindestens eines Heizelements und mindestens eines Messelements notwendig. Ein erster Integrationsansatz ist in den Arbeiten [25, 48] beschrieben und in den Abbildungen 2.9 und 2.15 a) dargestellt: Nach maskierter Schwerionenbestrahlung wird das Nanoporenmaterial aufgeätzt. Darin werden Nanodrahtarrays abgeschieden [85] und diese werden durch eine strukturierte Deckschicht miteinander verbunden.

Um den Verbund aus Nanodrahtarrays einfach handhaben und gut elektrisch kontaktieren zu können, verbindet die Deckschicht drei Nanodrahtarrays miteinander. Dieser Verbund wird auf ein Substrat mit strukturiertem Heizelement und Leiterbahnen für die Kontaktierung der Nanodrahtarrays als

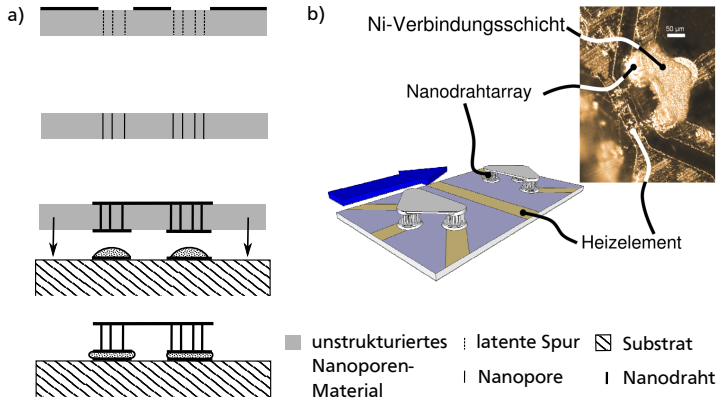


Abbildung 2.15: Nanodrahtarrays für einen Gasflusssensor: a) Prozessfluss zur separaten Nanodrahtsynthese und anschließenden Integration auf dem Substrat, b) Funktionsprinzip des Gasflusssensors mit zwei Verbünden aus Nanodrahtarrays als Messelemente und einem zentralen Heizelement [25].

Messelemente elektrisch leitend aufgeklebt. Abschließend ist das Templatmaterial zu entfernen, damit das Gas durch die Nanodrahtarrays strömen kann, vgl. Abbildung 2.15 b). Die Weiterentwicklung dieses Ansatzes ist Inhalt des aktuellen BMBF-Forschungsprojekts 3-DOING [68].

2.3.2 Aktorik

Nanomaterialien finden in der Mikroaktorktik nicht nur als funktionelle Aktor-Materialien Verwendung, z. B. auf Basis sich längender CNT, sondern auch als Hilfsmittel, z. B. um Kräfte für elektrische Schaltkontakte zu verringern oder um Adhäsion und Tribologie zu steuern, vgl. Tabelle 2.8.

Der Eintrag negativer Ladung in eine einwandige Kohlenstoffnanoröhre (SWCNT) kann zu deren Dehnung führen, vgl. Abbildung in Tabelle 2.7. Für die Anwendung als Aktormaterial kann man die SWCNT an beiden Enden mit einer festen Mikroelektrode und dazwischen durch einen flüssigen Elektrolyten kontaktieren, vgl. Abbildung 2.16 a). So bleibt die zwischen zwei Mikroelektroden aufgespannte SWCNT flexibel und kann sich bei Ladungseintrag um 1,2% längen [263]. Die Dehnung der CNT basiert auf

Tabelle 2.8: Anwendungen der Mikro-Nano-Integration: Aktorik.

Nanomat.	Aktorik
	MNI = Nanomaterial mit μm -Außenabmessungen, N = einzelne Nanoobjekte (der Nanotechnologie zuzuzählen), Mi = wie MNI jedoch Objekte $\gg 100\text{ nm}$; Material („M=“): Met = Metalle, Pol = Polymere, Ox = Oxide, Si = Si und Si-Verbindungen, Gla = Glase, C = CNT und Kohlenstoff-Materialien
0-D	<ul style="list-style-type: none"> • Elastormeraktoren mit gesenkter Betriebsspannung [257, 258] (MNI M=Ox)
1-D	<ul style="list-style-type: none"> • Elastormeraktoren mit gesenkter Betriebsspannung [259, 260] (MNI M=C) • Elektrothermomechanische Mikroaktoren mit verbesserter vertikaler Wärmeleitung [261] (MNI M=Si) • Elektrothermomechanische Mikroaktoren aus CNT-Polymer-Verbundmaterial [132] (MNI M=C+Pol) • Aktor durch CNT-Längenänderung bei Ladungseintrag, nass: [116, 262–266] (Mi M=C), trocken: [267–269] (MNI M=C+Pol) • Mikropinzette mit CNT-Aktoren im Elektrolyten [165, 225] (MNI M=C) • Bistabile Haltefunktion im Mikrorelais [270, 271] (MNI M=CNT) • Mikropumpe ohne bewegliche Teile durch Schalten der Benetzungszustände [272] (MNI M=Pol) • Verringerte Kontaktwiderstände in Mikrokontakten [273] (MNI M=Met) • Schutz geschalteter Mikrokontakte [274] (MNI M=C) • Elektrostatische Aktoren [165] (N + MNI M=C) • Adhäsions- und Tribologie-Steuerung mit vertikalen Fasern [275] (MNI M=Pol) [276–279] (Mi M=Pol) • MWCNT als mechanisches Lager für innen liegendes CNT [165, 280, 281] (N M=C) • Torsionsfeder im Micro Mirror Device (MMD) [282] (Mi M=Si) [283] (Mi M=Met) • Biegefeder im MMD [284–286] (Mi M=Si, Met) [287] (Mi M=Si)
2-D	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrochemisch gesteuerter Aktor mit Monolage künstlicher Muskeln [288] (N M=Pol)

Umladungsvorgängen der elektrolytischen Doppelschicht auf der Oberfläche der SWCNT in Lösung vgl. Anhang C. Daher sind niedrige Betriebsspannungen nötig, um faradaysche Vorgänge wie Metallabscheidung oder Zersetzung von Wasser an den CNT zu verhindern.

Durch Parallel- und Reihenschaltung mehrerer SWCNT lassen sich rechnerisch Leistungsdaten erreichen, die piezoelektrischen Aktoren ähneln – jedoch bei wesentlich geringeren Betriebsspannungen [116], vgl. Abbildung 2.16 b).

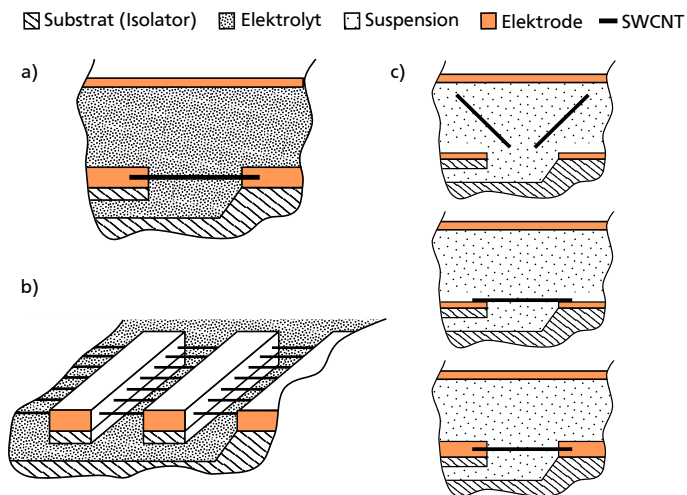


Abbildung 2.16: Mikroaktor aus funktionellen SWCNT [116, 263, 265, 266]: a) Eine beidseitig fixierte SWCNT, b) Mehrere SWCNT parallel und in Reihe geschaltet, c) Prozessfluss zur Integration der SWCNT (Suspension applizieren, SWCNT elektrophoretisch immobilisieren, SWCNT galvanisch kontaktieren).

Abbildung 2.16 c) stellt einen Weg zur Integration der CNT auf ein Mikroelektrodensubstrat dar. Die SWCNT werden in einer Suspension auf das Isolator-Substrat mit Mikroelektroden aufgebracht. In einem elektrischen Wechselfeld (ca. 20 MHz) zwischen den Mikroelektroden werden nur die metallischen SWCNT ausgerichtet auf den Mikroelektroden abgeschieden. Tauscht man die Suspension gegen einen Galvanik-Elektrolyten aus (z. B. Nickelsulfamat), lassen sich anschließend die metallischen SWCNT durch galvanische Abscheidung mechanisch und elektrisch mit den Mikroelektroden verbinden. Für den Betrieb des Aktors ist abschließend der Elektrolyt zur Metallabscheidung durch einen gut leitfähigen Elektrolyten ohne Tendenz zur Metallabscheidung zu ersetzen.

In Antriebssystemen spielt die Kräfteübertragung zwischen Antrieb und Abtrieb eine entscheidende Rolle [196, 289–291]. Zum Beispiel für Mikroschrittantriebe [292, 293] ohne feste Verzahnung kann eine richtungsabhän-

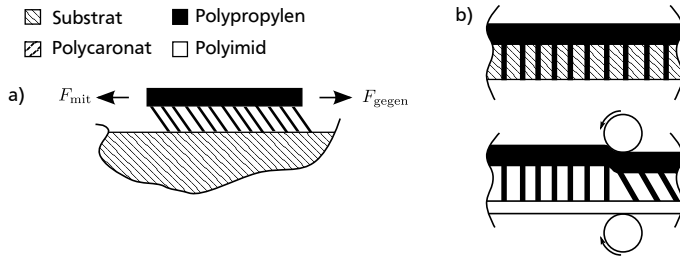


Abbildung 2.17: Gecko-inspirierte Adhäsionskontrolle mit geneigten Mikrofasern [278]: a) Richtungsabhängige Adhäsionskräfte, b) Fertigungsablauf der Mikrofasern-Proben.

gige Adhäsion vorteilhaft sein. [278] zeigt, dass sich dazu schräg gestellte Mikrofasern aus festen Polymeren eignen. Bei einer Bewegung in Richtung der Faserneigung (F_{mit} in Abbildung 2.17 a) werden die Fasern elastisch umgebogen und die Kontaktfläche der Fasern mit dem Kontaktpartner vergrößert sich. Bei einer Bewegung entgegen der Faserneigung (F_{gegen} in Abbildung 2.17 a) richten sich die Fasern auf und die Kontaktfläche verringert sich. Die Größe der Kontaktfläche bestimmt direkt die Größe der Adhäsionskraft. Das Verhältnis der Kontaktflächen in den Fällen der beiden Bewegungsrichtungen und damit das Verhältnis der Adhäsionskräfte $F_{\text{mit}}/F_{\text{gegen}}$ wurde experimentell und rechnerisch mit 18 bestimmt [278].

Die Fertigung dieser Fasern ist sehr einfach gestaltet (vgl. Abbildung 2.17 b): Eine 25 µm dicke Schicht Polypropylen wird auf ein Polycarbonat-Templat mit Mikroporen (0,6 µm) gegossen. Bei 200°C im Vakuum-Ofen zieht ein Teil des Materials in das 20 µm dicke Polycarbonat-Templat ein und härtet aus. Anschließend wird das Polycarbonat-Templat mit Dichlormethan (DCM) entfernt und mit Isopropylalkohol (IPA) gespült. Um die Neigung der Mikrofasern einzustellen, durchläuft die Probe nun einen auf 50°C beheizten Laminator-Aufbau. Dabei verhindert eine Polyimidfolie auf der Faserseite das Anhaften an den beheizten Rollen [276–278]. Diese makroskopische Probe ist noch nicht in ein Mikroantriebssystem integriert, jedoch besteht eine große Ähnlichkeit zu den oben beschriebenen Verfahren zur Integration von Nanodrähten in Mikrosysteme, sodass eine Integrierbarkeit offensichtlich erscheint. Hilfreich dabei ist, dass die beschriebenen Strukturen selbstreinigende Eigenschaften aufweisen [294] und so eventuell entstehender Abrieb kein Problem für die Funktion darstellt.

Eine schematisch sehr ähnliche Struktur aus Metall lässt sich als Mikro-Kontaktmaterial nutzen, das bereits bei geringen Kontaktkräften niedrige Übergangswiderstände ermöglicht [273]. Die senkrecht oder leicht geneigt auf einem Mikrokontakt stehenden Metallfasern sind stark nachgiebig und bilden daher bereits bei geringen Kräften elektrische Kontaktpunkte (A-Spots) aus. Bei geringen Kräften ist im Gegensatz zu festen Mikroelektroden ein größerer Hub notwendig, um den Kontaktwiderstand durch Erhöhung der Anzahl von A-Spots zu senken.

Auch die Fertigung dieser makroskopischen Proben ist verhältnismäßig einfach gestaltet [273]: Auf ein Polycarbonat-Templat wird eine niedrigschmelzende Ce-Bi-Legierung aufgebracht, um ohne ein PVD-Verfahren eine geschlossene galvanische Startschicht auszuformen. Anschließend werden Metalldrähte galvanisch in das Templat abgeschieden sowie überwachsen. Nach Entfernen der Ce-Bi-Startschicht und Auflösen des Polycarbonat-Templats, erhält man Proben, deren Fasern durch die überwachsene Schicht zusammengehalten werden. Diese makroskopischen Proben sind noch nicht in ein Mikrosystem integriert, zeigen aber durch die Ähnlichkeit zu den oben beschriebenen Strukturen und Verfahren eine zukünftige Anwendung metallischer Fasern auf. Entsprechende Ansätze sind Gegenstand der Forschung [5, 295].

2.3.3 Elektronik

Nanomaterialien finden in der Elektronik z. B. für die Realisierung neuartiger Bauelemente sowie auf verschiedenen Ebenen der Kontaktierung Beachtung, vgl. Übersicht in Tabelle 2.9.

Hochintegrierte Halbleiterschaltungen haben mehrere Ebenen, vgl. Abbildung 2.18 a). Die unterste Ebenen-Gruppe beinhaltet die Halbleiterbauelemente sowie die erste Kontaktierungsebene mit ohmschen Kontakten (Front End Of Line, FEOL). Dort kommen kleinste Strukturweiten von 32 nm (DRAM $\frac{1}{2}$ pitch) bzw. 20 nm (Flash $\frac{1}{2}$ pitch) zum Einsatz [71]. Die darüber liegenden Verdrahtungs-Ebenen (Back End Of Line, BEOL) verschalten die einzelnen Halbleiterbauelemente zu Halbleiterschaltungen. Via-Strukturen stellen Kontakte zwischen den Verdrahtungsebenen her, die kleinsten dieser Strukturen heißen Damaszener-Strukturen, vgl. Tabelle Anhang C.3. Die FEOL- und die BEOL-Ebenen werden im Scheiben-Verbund im sogenannten Front-End einer Fertigungseinrichtung prozessiert. Die nachgelagerten

Tabelle 2.9: Anwendungen der Mikro-Nano-Integration: Elektronik.

Nanomater.	Elektronik
	MNI = Nanomaterial mit μm -Außenabmessungen, N = einzelne Nanoobjekte (der Nanotechnologie zuzuzählen), Mi = wie MNI jedoch Objekte $\gg 100\text{ nm}$; Material („M=“): Met = Metalle, Pol = Polymere, Ox = Oxide, Si = Si und Si-Verbindungen, Gla = Glase, C = CNT und Kohlenstoff-Materialien
0-D	<ul style="list-style-type: none"> • Thermisch leitfähige Photolacke [32, 108, 109] (MNI M=Ox,C) • Gedruckte Leiterbahnen und Antennen aus Nanopartikel-Tinten [296, 297] (MNI M=Met) • Mikroschalter mit elektrisch leitfähigen Nanopartikeln [298]
1-D	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Bondverbindung mit vertikalen Fasern sowie konischen Strukturen mit kleiner Spitze [143, 299–302] (MNI M=Met) • Mechanische Bondverbindung mit vertikalen Fasern [303–306] (MNI M=Si,Ox) [199] (MNI M=Gla) [307] (MNI M=Germanium) • Niedertemperatur-Lot durch Nanofaser-Instabilitäten [308–311] • Elektrisch leitfähige Klebstoffe und Photolacke [31, 296] (MNI M=C) • Via-Strukturen im Halbleiter-Chip [312–315] (N, MNI M=C), [134, 316–324] (Mi M=Met) • Gedruckte Leiterbahnen mit leitfähigen Nanofasern [325] (MNI M=Met) • Gedruckte flexible und transparente Elektroden [326–328] (MNI M=Met) • Feldemissionsquelle durch stehende Nanofaser mit sehr dünner Spitze [161] (N M=C) [329–331] (Mi M=Met) [332] (Mi M=Si) • Feldeffekt-Transistoren [219, 333] (N M=C) [334] (N M=Si) • Mechanischer Schalt-Transistor [165, 335–338] (N M=C) • Spannungsgesteuerter nicht flüchtiger Speicher [339, 340] (N M=C) • Oszillator bzw. Verstärker durch horizontal vibrierende Nanofasern [341] (N M=Si,C) [342] (N M=Met) • Auf vertikalen Fasern aufgehängte Nanomagnete für Datenspeicher [343, 344] (Mi M=Met) • Hochfrequenz-Zirkulatoren (32 GHz) mit magnetischen Nanodrähten [345–349] (MNI, M=Met)
2-D	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrapräzisionsmontage [350–352] (MNI M=Pol) • Feuchte-Barriere durch Nanoplättchen in der Vergussmasse [353] (MNI M=Ox) • Lötverbindungen mit geringem thermischen Eintrag durch exotherm reaktive Schichten [103, 105, 354, 355] (MNI M=Met)
3-D	<ul style="list-style-type: none"> • Airgap-Prozess: Durch nanoporöse Materialien im Chip-Fertigungsprozess ist der Spalt zwischen Leiterbahnen mit Vakuum gefüllt: ein Dielektrikum für geringere Verluste [356, 357] (MNI M=Pol) • Bondverbindungen durch exotherm reaktive Schichten [358] (MNI M=Si)

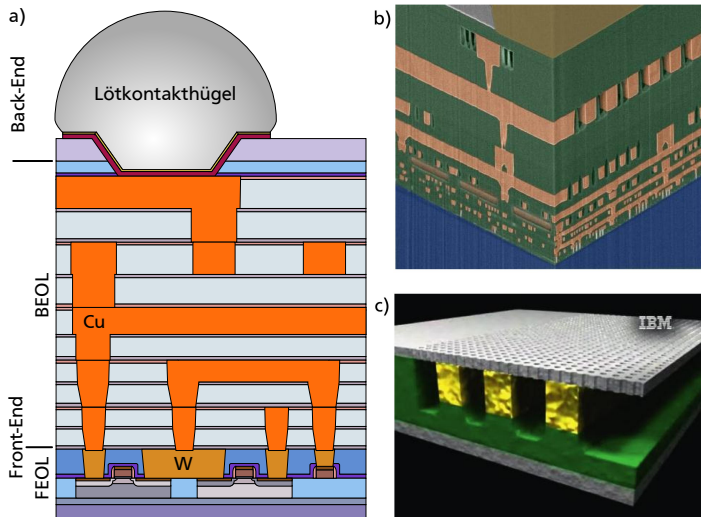


Abbildung 2.18: a) Schematischer Aufbau eines CMOS-Chips mit fünf Verdrahtungsebenen, b) REM-Schnittansicht eines mit der Airgap-Technologie gefertigten Halbleiterchips [359], c) Simulationsansicht der Airgap-Technologie: Oben aufliegender Polymerfilm mit Nanoporen während des Isolator-Ätzens [360].

Back-End-Schritte beinhalten die Vereinzelung der Scheiben in Chips sowie Aufbau- und Verbindungstechniken.

Die Damaszener-Strukturen bestehen heute aus Cu [133] und realisieren bei Strukturweiten im Bereich 100 nm – 1 µm sehr geringe Übergangswiderstände. Bei Strukturweiten im unteren Bereich des Nanomaßstabs steigt der Widerstand von Cu signifikant an [314, 315]. CNT bieten hier geringere Übergangswiderstände, jedoch ist bei den Integrationsprozessschritten auf die Auswirkungen der hohen Prozesstemperaturen auf die Halbleitermaterialien und Schichtverbünde zu achten [312, 313], vgl. Abschnitt 2.2.1.

Zusammen genommen haben die Leiterbahnen und Via-Strukturen der BEOL-Verdrahtungsebenen bei den Hochleistungs-Chips häufig mehrere Kilometer Länge, wodurch sich eine große Oberfläche zur kapazitiven Kopplung ergibt. Bei den hohen Taktfrequenzen der Schaltungen ergeben sich hohe Verschiebungsströme und kapazitive Verluste im Dielektrikum, die zur Wärmeentwicklung beitragen. Mit Hilfe des Airgap-Prozesses lässt sich im

Herstellungsprozess das Material zwischen den Leiterbahnen durch Vakuum ersetzen und somit lassen sich die Dielektrizitätszahl ϵ , folglich die Kapazität und die Verschiebungsströme sowie der Verlustwinkel $\tan \delta$ senken, vgl. Abbildung 2.18 b). Der Prozess basiert auf einem Polymerfilm mit Nanoporen, der auf eine planarisierte Verdrahtungsebene aufgebracht wird, vgl. Abbildung 2.18 c) [356, 357]. Die Nanoporen ordnen sich selbstorganisiert regelmäßig an. Nach einem selektiven Ätzprozess durch die Poren hindurch dient der Film zum Versiegeln der Kavitäten unter Vakuum.

Die Kombination mehrerer gestapelter Chips in einem Gehäuse (stacked dies, [361], [29] S. 65) verringert den Flächenbedarf der Schaltung durch Ausnutzung der dritten Dimension [362, 363]. Außerdem vereinfacht sich die Kombination mehrerer standardisierter Schaltungen und spezieller MEMS-Chips zu anwendungsspezifischen Schaltungen und Sensorsystemen. Somit können leistungsfähige Halbleiterbauelemente nun platzsparend mit Chips kombiniert werden, die nicht CMOS-kompatibel gefertigt werden können (z. B. durch Einsatz von KOH beim anisotropen Ätzen von Silizium oder durch hohe Temperaturen beim Abscheiden von CNT).

Bisher war Drahtbonden Stand der Technik für die elektrischen Direkt-Verbindungen einzelner Chips. Dieses feinwerktechnische Verfahren begrenzte die Miniaturisierung vor allem vor dem Hintergrund, dass in mobilen Anwendungen der Bauraum des gehäuseten Bauteils relevant ist. Heute kommen galvanisch abgeschiedene Silizium-Durchkontaktierungen aus Kupfer zum Einsatz (Trough Silicon Via, TSV), vgl. Anhang C.2.3 [318–324]. Dies sind in Silizium eingebettete, vertikal orientierte Stäbchen bzw. Drähte. Das duktile Kupfer der TSV eignet sich zum direkten Kontaktieren mehrerer Chips in zwei Schritten: mechanisch verpressen und anschließend tempern. Die hier verwendeten Kupferstrukturen weisen Aspektverhältnisse größer zehn und für die Mikro-Nano-Integration interessante Materialeigenschaften auf. Außerdem gibt es Bestrebungen, Front-End-Ebenen direkt miteinander zu verbinden, um Signallaufzeiten zu reduzieren. Dazu werden aktuell Strukturweiten kleiner 3 μm untersucht [362].

Will man Chips mit sich gegenüberstehenden Kontaktflächen verbinden, ist auch der Einsatz von „Nanorasen“-Kontakten möglich, vgl. Abbildung 2.19 a) [300]. Nähern sich die einzelnen Nanofasern an (vgl. Abbildung 2.19 b), entstehen Adhäsionskräfte, die die Kontaktflächen mechanisch und elektrisch miteinander koppeln. Nähern sich die Nanofasern nur bis zu einem gewissen Grad an und werden sie im Wesentlichen nur elastisch verformt, entsteht eine lösbare „Klettverschluss“-Verbindung, vgl.

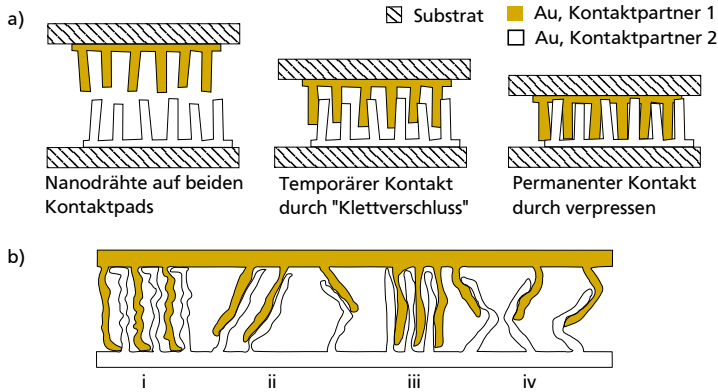


Abbildung 2.19: „Nanoräsen“-Kontakte: a) Phasen beim Fügen der Kontakte nach [300]; b) Bondfördernde Mechanismen: i: Spitzendeformation an den Flächen der Gegenkontakte führen zur Vergrößerung der Bondfläche, ii: Bei Auftreten eines punktförmigen Kontakts führt das Wanderkeilprinzip zur flächigen Kontaktausbildung, iii: Kapillarkräfte führen zur Verschränkung der Nanofasern, iv: Selbsthemmung durch Verschränkung nach [305, 306].

auch [364]. Theoretisch ist diese sehr häufig rekonfigurierbar und eignet sich z. B. um nach einem elektrischen Funktionstest einer Baugruppe einzelne Chips neu zu kontaktieren oder auszutauschen. Weiterhin kann man mit geringeren Kräften als bei duktilem Vollmaterial feste Verbindungen zwischen den beiden Bondpartnern realisieren: Die Nanohaare werden jetzt plastisch verformt und miteinander verpresst, vgl. Abbildung 2.19 a). Wie im Abschnitt 2.2.2 beschrieben, liegt eine technologische Herausforderung in der Vor-Ort-Synthese der dafür benötigten metallischen Nanofasern.

Weiterhin kann man ausnutzen, dass die Nanodrähte bei einer Temperatur wesentlich kleiner als der Schmelztemperatur zerfallen [308–310]. Dieser Vorgang lässt sich mathematisch ähnlich beschreiben wie der Zerfall eines Tintenstrahls am Ausgang eines mikromechanisch gefertigten Tintenstrahl-druckkopfs. Phänomenologisch betrachtet ist so ein Nanodraht-Lotmaterial mit gesenktem Schmelzpunkt möglich [311].

Voraussichtlich werden durch diese Miniaturisierungs-Bestrebungen multifunktionale Systeme mit geringem Bauvolumen möglich, die in mobilen

Anwendungen nah am Menschen zum Einsatz kommen können, vgl. z. B. [365].

2.3.4 Optik

Tabelle 2.10: Anwendungen der Mikro-Nano-Integration: Optik.

Nanomater.	Optik
	MNI = Nanomaterial mit μm -Außenabmessungen, N = einzelne Nanoobjekte (der Nanotechnologie zuzuzählen), Mi = wie MNI jedoch Objekte $\geq 100\text{ nm}$; Material („M=“): Met = Metalle, Pol = Polymere, Ox = Oxide, Si = Si und Si-Verbindungen, Gla = Glase, C = CNT und Kohlenstoff-Materialien
0-D	<ul style="list-style-type: none"> • Quantenpunktlaser [366–368] (MNI M=GaInAs,InAs) • Erhöhte IR-Emission durch nanoamorphe Oberfläche [180, 181] (MNI M=C)
1-D	<ul style="list-style-type: none"> • Gezielte Emissionseigenschaften durch periodisch angeordnete, vertikal integrierte Submikrodrähte [369] (Mi M=Si) [370] (Mi M=Met) • Erhöhte IR-Emission bzw. IR-Transmission durch vertikale Nanofasern [197, 198] (MNI M=Si,Met,Ox) • Photodetektor aus in Polymer eingebetteten CNT [371, 372] (MNI M=C) • Photoemitter aus CNT [373, 374] (MNI M=C) • Schaltbare Reflexion im MOEMS-Shutter sowie durchstimmbares NIR-Filter (Fabry-Pérot-Prinzip) [375] (Mi M=Si) • Röntgen-Strahlungsquelle [161] (N M=C) • Terahertz-Strahlungsquelle [376] (MNI M=InAs) • Nanodrähte als Laser-Resonatoren [377] (MNI M=Ox)
2-D	<ul style="list-style-type: none"> • Diffraktive Optische Elemente [378] (N M=Gla,Met) • 2-D photonischer Kristall [379–381] (MNI M=Pol)
3-D	<ul style="list-style-type: none"> • Photonischer Kristall [382–384] (Mi M=Pol) • OLED-Material im nanoporösen Templat [385] (MNI M=Pol)

Die Optik und insbesondere die Mikrooptik bieten sehr viele Möglichkeiten, Nanoobjekte für neue Effekte zu nutzen. Hier kommt der oben genannte Effekt zum Tragen: Die Strukturweite erreicht eine kritische Dimension physikalischer Vorgänge – hier die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Der Fokus der Arbeit liegt auf metallischen Drähten mit elektromechanischer Anwendung, weshalb hier nur eine kleine Auswahl des Themenfelds Optik dargestellt sein soll, vgl. Tabelle 2.10.

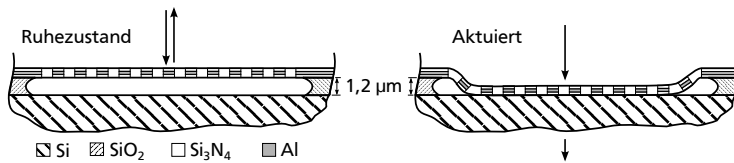


Abbildung 2.20: Shutter für von oben einfallende IR-Strahlen nach [375].

Einen Shutter in mikrooptoelektromechanischen Systemen (MOEMS) kann man beispielsweise wie in Abbildung 2.20 dargestellt aufbauen. Ist eine mikro- bzw. nanostrukturierte Anti-Reflex-Schicht als Membran ausgeführt, kann man durch die Membranbewegung die Lichteinkopplung in ein darunter liegendes Substrat verändern: Im Ruhezustand gelangt wenig Licht in das Substrat, im aktuierten Zustand führt die direkt auf dem Substrat aufliegende Anti-Reflex-Schicht zu einer starken Lichteinkopplung im gewünschten Spektralbereich.

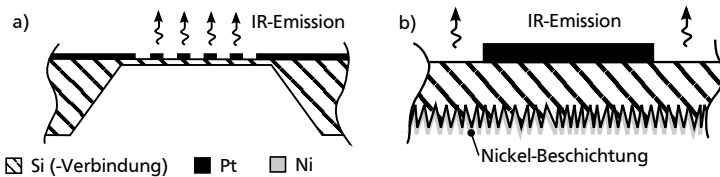


Abbildung 2.21: IR-Emitter mit Pt-Heizleiter auf dünner Membran: a) Häufig verwendete Konfiguration [386], b) Mit Nanofasern modifizierte Membran-Unterseite nach [198].

IR-Emitter finden in vielen Bereichen Anwendung, z. B. in der Analyse von Getriebe-Ölen, denn die IR-Transmission ist ein Indikator für den Öl-Zustand. Häufig wird dieses Öl prophylaktisch mit erheblichem Aufwand ausgewechselt, obwohl eine spätere Analyse im Labor zeigt, dass man es hätte noch weiter nutzen können. Abhilfe können mikrooptische Online-Ölanalyse-Systeme bringen [198].

In der Regel besteht ein thermischer IR-Emitter aus einer dünnen Membran mit darauf strukturiertem Pt-Heizer, vgl. Abbildung 2.21 a). Die dünne Membran ermöglicht einen geringen Wärmeabfluss in das Substrat sowie eine geringe thermische Kapazität, sodass der Emitter gepulst werden kann. Eine hohe Betriebstemperatur des Strahlers limitiert seine Lebensdauer sowie

seine maximale Modulationsfrequenz. Lässt sich die Emission effizienter gestalten, werden niedrigere Betriebstemperaturen und damit höhere Lebensdauern und höhere Betriebsfrequenzen möglich.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz besteht in der Nanostrukturierung der Membranunterseite, vgl. Abbildung 2.21 b). Dort kann man z. B. mit einem selbstmaskierenden Tief trockenätzprozess [197] ca. $2\text{ }\mu\text{m}$ lange Si-Nanodrähte hinein ätzen. Bedampft man die Si-Nanodrähte anschließend mit 400 nm Ni, erhöht sich die Emission des Strahlers erheblich. Ohne Nanostrukturen emittiert der Pt-Heizleiter stärker als die Zwischenräume (Abbildung 2.21 a). Mit Nanostrukturen emittieren die Zwischenräume wesentlich stärker als der noch immer ähnlich emittierende Heizleiter (Abbildung 2.21 b) [198].

2.3.5 Chemie/Energie/Bio

Tabelle 2.11 stellt einen Überblick über einen kleinen Ausschnitt der im Bereich Chemie/Energie/Bio gezeigten Anwendungen dar.

Ordnet man Nanofaser-Bündel aus hochgeordneten CNT oder Gold-Nanodrähten in einer spezifischen Mikroordnung an, lassen sich darauf lebende Zellen züchten [427] und direkt elektrisch kontaktieren [130]. Die hohe spezifische Oberfläche der Nanomaterialien stellt viele Anknüpfungspunkte für lebende Zellen zur Verfügung, die sich so an Elektroden anbinden lassen. Die zweite Spalte in Tabelle 2.3 zeigt bereits, wie mehrere CNT-Blöcke in ein Multielektrodenfeld (MEA) integriert werden können. Da die biologischen Zellen in einem Fluid kultiviert werden, sind die elektrischen Kontakte von den Kontaktfeldern am Rand des Chips bis zu den Füßen der CNT-Blöcke durch eine Isolatorschicht abgedeckt.

Die Reaktionsrate vieler elektrochemischer Vorgänge hängt direkt mit der Größe der elektrisch leitenden Oberfläche zusammen. Das große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis der Nanomaterialien kann daher zur Leistungssteigerung genutzt werden. Akkumulatoren für mobile Geräte stehen unter einem großen Miniaturisierungsdruck und haben gleichzeitig ein großes Marktvolumen [428], weshalb dieser Anwendung besondere Bedeutung zukommt.

Dünnschicht-Akkumulatoren weisen eine hohe Leistungsdichte auf, da der Elektrodenabstand nur bei einigen Mikrometern liegt und so die Reaktionen

Tabelle 2.11: Anwendungen der Mikro-Nano-Integration: Chemie/Energie/Bio.

Nanomater.	Chemie/Energie/Bio
	MNI = Nanomaterial mit µm-Außenabmessungen, N = einzelne Nanoobjekte (der Nanotechnologie zuzuzählen), Mi = wie MNI jedoch Objekte ≥ 100 nm; Material („M=“): Met = Metalle, Pol = Polymere, Ox = Oxide, Si = Si und Si-Verbindungen, Gla = Glase, C = CNT und Kohlenstoff-Materialien
0-D	<ul style="list-style-type: none"> • Magentische Nanopartikel in PDMS-Mikrostäbchen zur Zellmanipulation [387] (MNI M=Met)
1-D	<ul style="list-style-type: none"> • Segmentierte Nanodrähte als Nanobarcodes in Medikamenten [85, 388, 389] • Elektroden zur Zellankopplung [130, 161, 390–392] (MNI M=C) • Thermoelektrische Generatoren [244] (MNI M=Met) • Erhöhtes Signal im Chemosensor [393] (MNI M=Pol) • Mechanoelektrischer Generator mit Nanofasern [394] (MNI M=Ox) • Akkumulatoren mit erhöhter Elektrodenfläche durch Nanofasern [395, 396] (MNI M=Met) [87, 129, 159, 397–404] (MNI M=C) • Akkumulator-Kondensator-Kombinationen [405] (MNI M=C) • Kondensatoren mit erhöhter Oberfläche [406] (MNI M=Met,Ox) • TSV-Strukturen für miniaturisierte Brennstoffzelle [407, 408] (Mi M=Met) • Supraboeingstrukturen aus verschränkten Submikrodrähten für Thermomanagement [409] (Mi M=Met)
3-D	<ul style="list-style-type: none"> • Kondensatoren mit erhöhter Oberfläche in Nanoporen [410–414] (MNI M=Met,Ox) • Akkumulatoren mit erhöhter Oberfläche in Nanoporen [406, 415] (MNI M=Met,Ox) • Zylindrische Nanoporen zur biochemischen Zelldetektion und Medikamentenscreening [416–424] • Zylindrische Nanoporen im mikrofluidischen Chip zum integrierten Filtrieren biologischer Flüssigkeiten [425, 426]

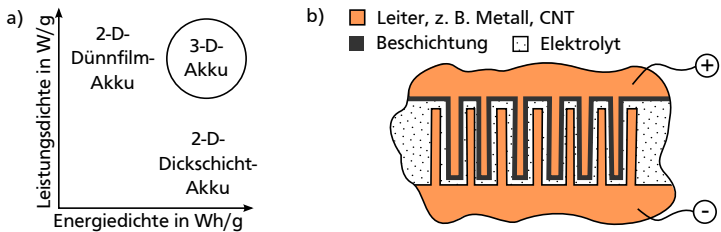


Abbildung 2.22: 3D-Mikroenergiespeicher: a) Leistungs- und Energiedichten verschiedener Mikroakkumulator-Bauformen nach [396], b) Verschränkte Nanofaserelektroden nach [396, 406].

schnell ablaufen können, vgl. Abbildung 2.22 a) [429]. Ihre glatten Oberflächen bedeuten jedoch einen geringen spezifischen Flächeninhalt und damit eine geringe Energiedichte. Dickschicht-Akkumulatoren weisen durch ihre hochgranularen Oberflächen eine deutlich höhere spezifische Fläche und damit Energiedichte auf, jedoch bei größeren Elektrodenabständen und damit geringerer Leistungsdichte. Ein 3-D-Akkumulator mit geringen Elektrodenabständen und großer spezifischer Oberfläche kann grundsätzlich beide Vorteile miteinander verbinden, hohe Leistungsdichte mit hoher Energiedichte [396]. Vergleichbares gilt für Kondensatoren: Erhöhen der spezifischen Oberfläche und Senken des Elektrodenabstands führen zu einer vergrößerten spezifischen Kapazität.

Zur technischen Umsetzung kann man senkrecht stehende Nanofasern zweier sich gegenüberstehender Flächen miteinander verschränken, vgl. Abbildung 2.22 b). Dadurch sind die Abstände zwischen den Elektroden gering und gleichzeitig die spezifischen Oberflächen groß. Die experimentelle Umsetzung dieser Ansätze mit den entsprechenden Schichtabfolgen und reproduzierbaren Montageprozessen der Elektrodenmaterialien ohne Kurzschluss sind derzeit noch Gegenstand der Forschung.



3 Inertialsensoren mit senkrechten 1-D-Federelementen

Kapitel 2 zeigt, dass vertikal orientierte Nanofasern als sehr flexible Strukturen in Mikrosysteme integriert werden können. Die Nanoobjekte stellen grundsätzlich neuartige Bauelemente in Mikrosystemen dar, wo bisher lateral orientierte Strukturen dominieren. Die daraus folgenden neuen Gestaltungsfreiheitsgrade finden in diesem Kapitel Betrachtung.

Je weniger Fasern die Funktion eines Mikrosystems bestimmen, desto wichtiger ist deren Schutz vor makroskopischen Einflüssen um die Funktion des Mikrosystems zu sichern. In Inertialsensoren können alle Bauelemente hermetisch gekapselt sein und die Kräfte innerhalb der Sensoren lassen sich durch geometrische Parameter variieren. Somit sind Inertialsensoren prädestiniert, um die Funktion vertikal integrierter Fasern als flexible Strukturen im Mikrosystem zu demonstrieren.

Darüber hinaus eröffnet die Technologie der galvanischen Abformung vielfältige Möglichkeiten der Einflussnahme auf Materialeigenschaften. Durch die grundsätzlich andere Form einer vertikalen Faser im Vergleich zu einer flächigen Struktur, variieren die Vorgänge bei der Abscheidung. Darüber hinaus legen Grundlagenuntersuchungen nahe, dass sich Ermüdungserscheinungen metallischer Strukturen bei Fasern deutlich anders verhalten als bei flächigen Strukturen. Dies begründet die Motivation, metallische Fasern als dauerhafte eindimensionale Federelemente in Inertialsensoren einzusetzen.

3.1 Stand der Technik mikromechanischer Inertialsensoren

Die Detektion von Beschleunigungen und Drehraten hat sich von den Anfängen der Inertialsensorik in den 1920er Jahren bis heute von rein mechanischen, über optische und elektromechanische hin zu mikrooptoelektromechanischen Systemen (MOEMS) und MEMS entwickelt [430, 431]. Anfangs standen die Optimierung der Sensoreigenschaften und die Verringerung der Bauteilmasse im Vordergrund. Heute sind Reduktion der Kosten und des Bauteilvolumens sowie die Integration zu Multisensoren bedeutend, da mobile Anwendungen den größten Markt darstellen [73, 176, 432–434].

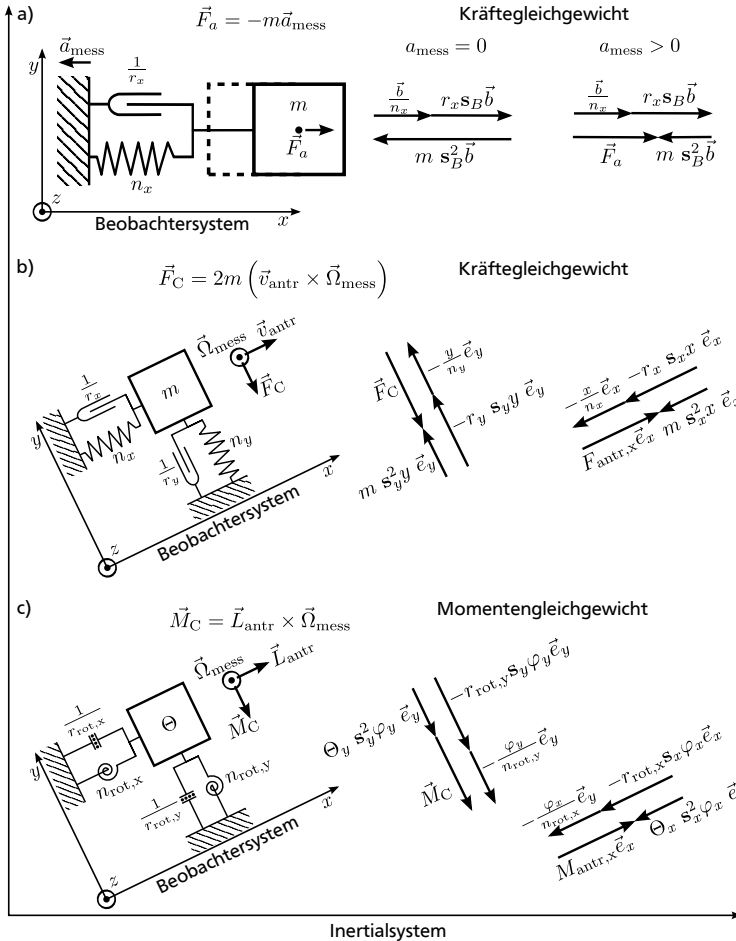


Abbildung 3.1: Verhalten der Probemasse (Masse m , Trägheitsmoment Θ), aufgehängt mit der Nachgiebigkeit n und der Reibungsimpedanz r : a) lineare Beschleunigung des Sensoraufbaus \vec{a}_{mess} resultiert in Kraft \vec{F}_a ; b) Rotation des Sensoraufbaus $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ und linear bewegte Probemasse \vec{v}_{antr} resultieren in Kraft \vec{F}_C ; c) rotierend angetriebene Probemasse \vec{L}_{antr} und Rotation des Sensoraufbaus $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ resultieren in Drehmoment \vec{M}_C . **Kräftegleichgewichte:** Die Probemasse ist in positive x -Richtung ausgelenkt und bewegt sich in positive x -Richtung. **Momentengleichgewichte:** Die Probemasse ist positiv um die x -Achse gedreht und rotiert positiv um die x -Achse.

Mechanische bzw. elektromechanische Inertialsensoren basieren darauf, das Verhalten einer beweglich aufgehängten Probemasse mit dem Ortsvektor \vec{b} bzw. $\vec{\varphi}$ des Schwerpunkts S in einem Sensoraufbau zu beobachten, vgl. Abbildung 3.1 und [435]. Physikalisch stellt dieser Sensoraufbau das Beobachtersystem B dar, das sich zum ruhenden „absoluten“ Inertialsystem I bewegen kann. Der hier verwendete Formalismus zur Beschreibung der dynamischen Vorgänge in Inertialsensoren ist auf die Zusammenhänge in rotierenden Systemen ausgelegt. Zum besseren Verständnis dieser Beschreibungsweise sei zunächst der einfache Fall einer linearen Bewegung entlang einer Achse dargestellt, der sich auch weniger komplex ausdrücken ließe, jedoch der Einführung der Beschreibungsweise dient. Zur kompakten Darstellung sei im Folgenden die zeitliche Ableitung eines Vektors mit dem vorangestellten Operator \mathbf{s}_B bzw. \mathbf{s}_I bezeichnet; der Index B bzw. I beschreibe den Bezug der zeitlichen Ableitung auf das Beobachtersystem bzw. das Inertialsystem. So gelte beispielsweise für das Beobachtersystem:

$$\mathbf{s}_B \vec{b} = \mathbf{s}_B \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{s}_B^2 \vec{b} = \mathbf{s}_B^2 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Gesucht sind Kräfte und Momente, die aus Sicht des Beobachtersystems auf die Inertialmasse wirken, also dem Aktionsprinzip folgen:

$$m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} = \vec{F}_{\text{gesamt}} \quad (3.3)$$

$$\Theta \mathbf{s}_B^2 \vec{\varphi} = \vec{M}_{\text{gesamt}} \quad (3.4)$$

Aus Sicht des Sensorsystems wirken auf die Probemasse die folgenden Kräfte und Momente (vgl. Abbildung 3.1)

- Kraft \vec{F}_a bei linearen Beschleunigungen \vec{a}_{mess} des Sensoraufbaus.
- Kraft \vec{F}_C bei Rotationsgeschwindigkeiten $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ des Sensoraufbaus, wenn die Probemasse orthogonal zur Rotationsachse des Beobachtersystems mit der Geschwindigkeit \vec{v}_{antr} linear angetrieben wird (Coriolis-Kraft).
- Moment \vec{M}_C bei Rotationsgeschwindigkeiten $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ des Sensoraufbaus, wenn die Probemasse orthogonal zur Rotationsachse des Beobachtersystems mit dem Drehimpuls \vec{L}_{antr} angetrieben rotiert (Coriolis-Moment).

Für MEMS-Inertialsensoren kommen nahezu ausschließlich linear oder rotatorisch vibrierende Strukturen zum Einsatz, die mit Festkörpergelenken aufgehängt sind [436]. In diesen Gelenken entsteht keine externe Reibung, weshalb sie sich für eine hohe Zyklenzahl eignen. Auch die interne Reibung ist gering, sodass hohe Schwinggüten möglich sind. Außerdem ist zur Fertigung kein Montageschritt nötig.

3.1.1 Beschleunigungssensoren

Als grundlegende Anordnung für mechanische Beschleunigungssensoren sei zunächst das in Abbildung 3.1 a) dargestellte System ohne Einwirkung einer externen Beschleunigung betrachtet. Somit ergibt sich für das Aktionsprinzip in Bezug auf das Beobachtersystem mit der Darstellung der Vektoren in Abbildung 3.1 a) Mitte:

$$\vec{F}_m = -\vec{F}_n - \vec{F}_r \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} = -\frac{\vec{b}}{n} - r \mathbf{s}_B \vec{b} \quad (3.6)$$

$$\Leftrightarrow 0 = m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} + r \mathbf{s}_B \vec{b} + \frac{\vec{b}}{n} \quad (3.7)$$

mit

$$\vec{F}_m = m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} = \text{Kraft zur Beschleunigung der Masse}$$

$$\vec{F}_r = r \mathbf{s}_B \vec{b} = \text{Reibkraft z. B. durch viskose Dämpfung}$$

$$\vec{F}_n = \frac{\vec{b}}{n} = \text{Federkraft}$$

Kommt nun die externe Beschleunigung \vec{a}_{mess} hinzu, resultierend in der entsprechenden Kraft aus Sicht des Beobachtersystems \vec{F}_a , folgt mit der Darstellung der Vektoren in Abbildung 3.1 a) rechts:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_a - \vec{F}_n - \vec{F}_r \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} = -m\vec{a}_{\text{mess}} - \frac{\vec{b}}{n} - r \mathbf{s}_B \vec{b} \quad (3.9)$$

$$\Leftrightarrow -m\vec{a}_{\text{mess}} = m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} + r \mathbf{s}_B \vec{b} + \frac{\vec{b}}{n} \quad (3.10)$$

mit

$$\vec{F}_a = -m\vec{a}_{\text{mess}} = \text{Beschleunigungskraft}$$

Die Schwingung des Systems ist ein periodischer Vorgang, der wegen der kompakteren Darstellungsweise im Folgenden im Frequenzbereich ausgedrückt sei. Die Vorgänge an den mechanischen Bauteilen seien beschrieben durch Nutzung der Netzwerkdarstellung von elektrischen Bauelementen mit konzentrierten Parametern nach [437]. Anstelle des Frequenzparameters von der Fourier-Transformation $j\omega$ sei hier zur einheitlichen Darstellung der Frequenzparameter der Laplace-Transformation $s = j\omega + \sigma$ mit dem Index des Bezugssystems verwendet. Für die drei Raumrichtungen im Beobachtersystem gilt somit:

$$s_x = j\omega_x + \sigma_x, \quad s_y = j\omega_y + \sigma_y, \quad s_z = j\omega_z + \sigma_z \quad (3.11)$$

Die in diesem Absatz beschriebenen Vorgänge sind alle eindimensionaler Natur, sodass die Vektoren $\vec{F}_a, \vec{F}_m, \vec{F}_r, \vec{F}_n, \vec{a}_{\text{mess}}$ und insbesondere \vec{b} lediglich Komponenten in x -Richtung aufweisen. Diese Komponenten seien zur Darstellung im Frequenzbereich komplex beschrieben, wobei der Realteil der komplexen Darstellung gleich der x -Komponente des Vektors sei. Somit seien die Vektoren beschrieben durch $\underline{F}_a, \underline{F}_m, \underline{F}_r, \underline{F}_n, \underline{a}_{\text{mess}}$ und insbesondere \underline{x} . Für die vorzeichenrichtige Darstellung ist die Zählweise $\underline{F}_a = m\underline{a}_{\text{mess}}$ zu beachten.

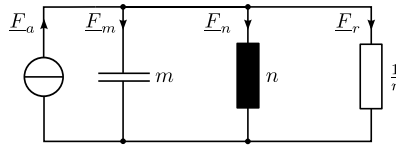


Abbildung 3.2: Ersatzschaltbild für einen Beschleunigungssensor nach Abbildung 3.1 a).

Wie in Abbildung 3.2 dargestellt, lässt sich das Verhalten der Inertialmasse aus Sicht des Beobachtersystems unter Einwirkung einer externen Beschleunigung wie folgt beschreiben:

$$\underline{F}_a = \underline{F}_m + \underline{F}_r + \underline{F}_n \quad (3.12)$$

$$\Leftrightarrow m\underline{a}_{\text{mess}} = ms_x^2\underline{x} + rs_x\underline{x} + \frac{\underline{x}}{n} \quad (3.13)$$

Daraus lässt sich die Übertragungsfunktion des Systems auf Basis der mechanischen Impedanz \underline{h} als Quotient aus der Differenzgröße \underline{v} und der Flussgröße \underline{F} aufstellen:

$$\underline{h} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}} = \frac{s_x \underline{x}}{m \underline{a}_{\text{mess}}} = \frac{s_x \underline{x}}{m s_x^2 \underline{x} + r s_x \underline{x} + \frac{x}{n}} \quad (3.14)$$

$$\Rightarrow \frac{\underline{x}}{\underline{a}_{\text{mess}}} = \frac{m}{m s_x^2 + r s_x + \frac{1}{n}} \quad (3.15)$$

$$= \frac{1}{s_x^2 + s_x \frac{r}{m} + \frac{1}{mn}} \quad (3.16)$$

$$= \frac{1}{s_x^2 + s_x \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (3.17)$$

$$= \frac{1}{s_x^2 + 2\delta \omega_0 s_x + \omega_0^2} \quad (3.18)$$

mit

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{mn}} = \text{Resonanzfrequenz} \quad [\omega_0] = \frac{1}{s} \quad (3.19)$$

$$Q = \frac{1}{\omega_0 n r} = \text{Resonanzgüte} \quad [Q] = 1 \quad (3.20)$$

$$\delta = \frac{1}{2Q} = \frac{\omega_0 n r}{2} = \text{Dämpfungskonstante} \quad [\delta] = 1 \quad (3.21)$$

Daraus folgt für das stationäre Verhalten $\underline{h}(s_x = 0)$:

$$S = \frac{x}{a_{\text{mess}}} = mn = \text{statische Empfindlichkeit} \quad [S] = s^2 \quad (3.22)$$

Für eine hohe Empfindlichkeit sind eine große Masse und eine hohe Nachgiebigkeit anzustreben, für eine hohe Dynamik umgekehrte Ziele. Daraus ergibt sich das Optimierungsziel eines maximalen Produkts $S \omega_0 = \sqrt{mn}$ [438, 439].

In Tabelle 3.1 sind mikromechanische Beschleunigungssensoren aufgelistet, die zur systematischen Unterscheidung im Hinblick auf diese Arbeit sortiert sind nach Aufhängung und Bewegungsform der Inertialmasse einerseits und dem verwendeten Fertigungsverfahren andererseits. Die Auflistung bezieht

Tabelle 3.1: Mikromechanische Beschleunigungssensoren aufgeführt nach Funktionsprinzip und Fertigungsverfahren. Messprinzipien: elektromagnetisch (*emag*), piezoelektrisch (*pele*), piezoresistiv (*pres*), kapazitiv (*kap*), Tunnelstrom-Messung (*tun*). In Kombination mit anderen Prinzipien: resonanter Betrieb (*reso*).

Seitenansicht im Schnitt <div> <div></div> Inertialmasse <div></div> Federelement <div></div> Verankerung </div>				
Federprinzip				
Silizium-Volumen-Mikromechanik / hybrid (z. B. mit Glas oder Quarz)	Biegebalken einseitig <i>pres</i> [440–443], <i>pres reso</i> [444, 445], <i>kap</i> [446–449], <i>tun</i> [450–453], <i>pele</i> [454, 455], <i>pele reso</i> [456], <i>emag</i> [457, 458]	Biegebalken mehrseitig <i>pres</i> [443, 459] <i>pres reso</i> [460], <i>kap</i> [447, 448, 461–464], <i>tun</i> [465–467]	Torsionsfeder <i>kap</i> [468, 469], <i>emag</i> [458]	Biegebalken/U-Feder <i>kap</i> [470], <i>kap reso</i> [471]
Oberflächen-Mikromechanik (Si u. ä., keine Metalle, keine Polymere)		<i>kap</i> [472–474]	<i>kap</i> [475–477]	<i>kap</i> [473, 474, 478–481], <i>kap reso</i> [482–484], <i>pele reso</i> [485]
LiGA u. ä.	<i>tun</i> [486]		<i>kap</i> [438, 487]	<i>kap</i> [438, 439, 488–496]

sich zumeist auf die ersten Veröffentlichungen zu der jeweiligen Konfiguration, da dort die Strukturen und Technologien am ausführlichsten dargestellt sind. Später liegt der Fokus der Veröffentlichungen häufig auf einer vorteilhaften Kombination von Elektronik und dem gegebenen mikromechanischen Bauelement. Darüber hinaus vermitteln die Veröffentlichungen [431, 432, 449, 497, 498] einen Überblick über den sehr umfangreichen Stand der Technik zu Beschleunigungssensoren.

In den ersten Sensoren dieser Kategorie wurden elektromagnetische (*emag*), piezoelektrische (*pele*) oder piezoresistive (*pres*) Messprinzipien eingesetzt. Erfahrungen mit mikrostrukturierten Resonatoren aus Quarz ebenso wie mit Drucksensoren aus Silizium haben dies technologisch begünstigt. Beschleunigungssensoren mit piezoresistivem Wirkprinzip hat man mit einer verhältnismäßig einfachen Fertigungstechnik aufbauen können und sie bieten durch eine niedrige Ausgangsimpedanz eine hohe Toleranz gegenüber Störeinflüssen. Der wesentliche Nachteil des piezoresistiven Wirkprinzips (*pres*) besteht im begrenzten Wert des piezoresistiven Koeffizienten Π (elektrische Widerstandsänderung bezogen auf die mechanische Spannung) in dotiertem Silizium. Neuere Untersuchungen zeigen, dass dieser sehr stark steigt, wenn Si-Nanodrähte anstelle planarer dotierter Bereiche in einer Membran zur Messung mechanischer Spannungen zum Einsatz kommen [499–501]. Interessant für die Anwendung können diese halbleitenden Nanodrähte werden, wenn das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) gegenüber etablierten Technologien wesentlich gesteigert werden kann.

Kapazitive Wirkprinzipien (*kap*) haben sich aktuell in der kommerziellen Anwendung durchgesetzt, da sie eine höhere Temperaturstabilität als piezoresistive Messprinzipien mit einer größeren Empfindlichkeit verbinden und somit kleinere Inertialmassen nötig sind. Parallel dazu hat sich der Einsatz von Tunnelstrom-Detektion (*tun*) aus den Erfahrungen mit der Rastersondenmikroskopie entwickelt. Die extrem hohe Empfindlichkeit – z. B. Verdoppelung des Tunnelstroms bei Elektrodenabstandsänderung um 1 \AA – birgt jedoch das Risiko, dass geringe Auslenkungen durch Unterschiede in Materialausdehnungskoeffizienten oder durch Materialkriechen das Messergebnis verfälschen [502].

Weiterhin lassen sich die Wirkprinzipien im Ausschlagverfahren ebenso wie im Kompensationsverfahren betreiben. Darüber hinaus werden die meisten Wirkprinzipien häufig im resonanten Betrieb (*reso*) eingesetzt, um eine höhere Empfindlichkeit auf Basis von Frequenzmodulation zu erreichen.

Typische Charakteristika kommerzieller Beschleunigungssensoren sind je nach Einsatzbereich [498]:

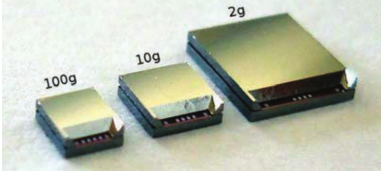
- Arbeitsbereich bzgl. Beschleunigung in g ($1g = 9,81 \frac{m}{s^2}$)
- Arbeitsbereich bzgl. Bandbreite in Hz
- Empfindlichkeit in $\frac{V}{g}$
- Auflösung in $\frac{\mu g}{\sqrt{Hz}}$
- Nichtlinearität in %
- Übersprechen aus anderer Achse in %
- Überlastfestigkeit in g
- Temperaturbereich in $^{\circ}C$
- Temperaturkoeffizient Nullpunkt in $\frac{\mu g}{^{\circ}C}$
- Temperaturkoeffizient Auflösung in $\frac{ppm}{^{\circ}C}$

Beispielsweise bietet die Firma *X-Fab* standardisierte Fertigungsverfahren an, um Beschleunigungssensoren mit $\pm 2g$, $\pm 10g$ und $\pm 100g$ zu fertigen [503, 504]. Auf Basis von Tieftrockenätzen (DRIE) und Flusssäuredampf-Ätzen lassen sich kapazitiv messende Silizium-Beschleunigungssensoren aufbauen, die Eigenschaften nach Tabelle 3.2 aufweisen.

Die Analyse des Markts zu hochminiaturisierten Inertialsensoren mit kapazitiver Detektion und optionaler elektrostatischer Aktuierung zeigt eine große Bandbreite der Anforderungen in den unterschiedlichen Anwendungsfeldern [45]. In Abbildung 3.3 sind die Anforderungen an die Messunsicherheit im Vergleich zum Bauraum der Inertialsensoren dargestellt, womit der Spielraum der unterschiedlichen Anwendungsfelder aufgewiesen wird. Mit Abstand die höchsten Anforderungen zeigen Systeme für die Inertialnavigation. Bei industriellen Anwendungen steht wesentlich mehr Bauraum als z. B. für Implantate zur Verfügung.

Alternativ zu den oben beschriebenen kontinuierlich ausgewerteten Sensoren gibt es Schwellwertschalter, deren elektrischer Kontakt bei einer konstruktiv vordefinierten Beschleunigung schließt bzw. öffnet [505–515]. Ihre Auswerteelektronik nimmt sehr wenig Leistung auf und daher eignen sich

Tabelle 3.2: Typische Messwerte von Beschleunigungssensoren, die auf Standard-Fertigungsverfahren der Firma X-Fab basieren [503, 504].

Parameter	100 g-Sensor	10 g-Sensor	2 g-Sensor	Einheit
Messbereich	± 100	± 10	± 2	g
Temperaturbereich	-40..125	-40..125	-40..125	°C
Grundkapazität	0,65	2,0	10,0	pF
Empfindlichkeit	0,27	3,2	22,0	fF/g
Resonanzfrequenz	18	10	8	kHz
Rauschleistungsdichte	12,0	1,0	0,25	mg/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Nichtlinearität	0,30	0,03	0,02	% v. E.
Bandbreite	> 3000	> 1500	> 500	Hz
Stoßfestigkeit	> 5000	> 3000	> 1000	g
Chipgröße	2,3 x 2,0	2,7 x 2,5	4,5 x 4,0	mm ²
Realisierte Chips				

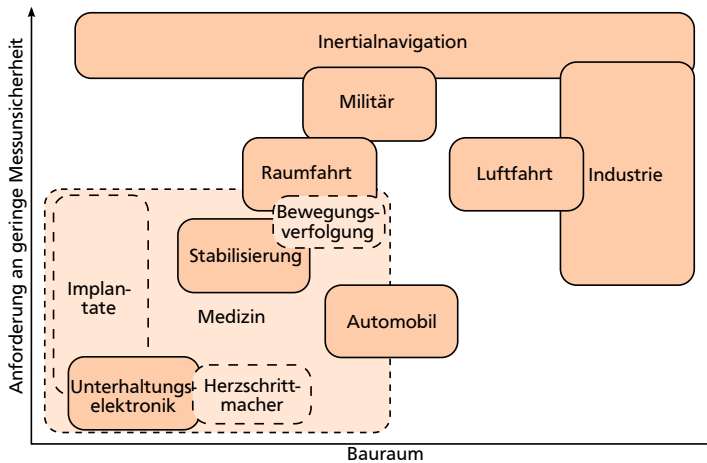


Abbildung 3.3: Anforderungen an Messunsicherheit und Bauraum für unterschiedliche Marktsegmente [45].

diese Bauteile insbesondere für mobile Anwendungen. Jeder Schwellwert-schalter spricht erst bei einer definierten Beschleunigung an, mehrere integrierte können als gesamtes Bauteil einen Beschleunigungsbereich abdecken.

3.1.2 Drehratensensoren

Wie in Abbildung 3.1 b) und c) dargestellt, ist zur Detektion der Drehrate eine angetriebene Bewegung der Inertialmasse notwendig. Tritt eine Drehrate auf, wird die bewegte Inertialmasse orthogonal zur angetriebenen Bewegungsrichtung und orthogonal zur Rotationsachse der Drehrate beschleunigt [516]. Diese Beschleunigung ist im mikromechanischen Drehratensensor zu detektieren. Dabei sei hier zunächst davon ausgegangen, dass keine lineare Beschleunigung des Gesamtsystems vorliegt.

Fall b) – lineare Bewegung der Inertialmasse

Im Fall b) sei von einer linear angetriebenen Bewegung der Inertialmasse orthogonal zur Rotationsachse des Beobachtersystems mit der Geschwindigkeit \vec{v}_{antr} ausgegangen:

$$\vec{v}_{\text{antr}} = \mathbf{s}_B \vec{b} \quad (3.23)$$

Untersucht werden soll eine Rotation des Beobachtersystems gegenüber dem Inertialsystem mit der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\Omega}_{IB}$. Dabei sei zunächst angenommen, dass keine Translation des Beobachtersystems gegenüber dem Inertialsystem stattfindet und beide Systeme den selben Koordinatenursprung haben. Der Ortsvektor \vec{b} des Probemassee-Schwerpunkts S ist im Inertialsystem definiert und die zeitliche Ableitung von \vec{b} in Bezug auf das Inertialsystem ist gesucht. Dazu kommt das Coriolis-Theorem ([430] Abschn. 1.9) zum Einsatz, das zur Berechnung von $\mathbf{s}_I \vec{b}$ neben der zeitlichen Ableitung von \vec{b} in Bezug auf das Beobachtersystem auch $\vec{\Omega}_{IB}$ und \vec{b} einbezieht:

$$\mathbf{s}_I \vec{b} = \mathbf{s}_B \vec{b} + \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{b} \quad (3.24)$$

Zweimaliges Anwenden des Coriolis-Theorems nach Gleichung (3.24) auf das Aktionsprinzip $m \mathbf{s}_I^2 \vec{b} = \vec{F}$ führt zu:

$$m \mathbf{s}_I^2 \vec{b} = m \mathbf{s}_I (\mathbf{s}_B \vec{b} + \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{b}) \quad (3.25)$$

$$= m (\mathbf{s}_B (\mathbf{s}_B \vec{b} + \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{b}) + \vec{\Omega}_{IB} \times (\mathbf{s}_B \vec{b} + \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{b})) \quad (3.26)$$

$$= m (\mathbf{s}_B (\mathbf{s}_B \vec{b} - \vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB}) - (\mathbf{s}_B \vec{b} + \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{b}) \times \vec{\Omega}_{IB}) \quad (3.27)$$

$$= m (\mathbf{s}_B^2 \vec{b} - \mathbf{s}_B \vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB} - \vec{b} \times \mathbf{s}_B \vec{\Omega}_{IB} - \mathbf{s}_B \vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB} - \vec{\Omega}_{IB} \times (\vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB})) \quad (3.28)$$

$$= m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} - 2m (\mathbf{s}_B \vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB}) - m \vec{\Omega}_{IB} \times (\vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB}) - m (\vec{b} \times \mathbf{s}_B \vec{\Omega}_{IB}) \quad (3.29)$$

Damit folgt für die Kräfte, die aus Sicht des Sensoraufbaus auf die Inertialmasse wirken:

$$m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} = \vec{F}_{\text{gesamt}} = \underbrace{m \mathbf{s}_I^2 \vec{b}}_{\text{äußere Gesamtkraft } \vec{F}_{\text{ext}}} + \underbrace{2m (\mathbf{s}_B \vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB})}_{\text{Coriolis-Kraft}} + \underbrace{m \vec{\Omega}_{IB} \times (\vec{b} \times \vec{\Omega}_{IB})}_{\text{Zentrifugalkraft}} + \underbrace{m (\vec{b} \times \mathbf{s}_B \vec{\Omega}_{IB})}_{\text{resultierende der Winkelbeschl.}} \quad (3.30)$$

Die Coriolis-Kraft ist als einzige Kraft nicht vom Ortsvektor \vec{b} abhängig, sondern nur vom Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{s}_B \vec{b} = \vec{v}_{\text{antr}}$ und lässt sich vereinfacht ausdrücken (Wirkung = Ursache \times Mittler):

$$\vec{F}_C = 2m (\vec{v}_{\text{antr}} \times \vec{\Omega}_{\text{mess}}) \quad (3.31)$$

Zur Betrachtung der einzelnen Raumrichtungen im Beobachtersystem B geht der Gesamt-Operator für die zeitliche Ableitung \mathbf{s}_B über in die auf die einzelnen Achsen bezogenen Operatoren \mathbf{s}_x , \mathbf{s}_y und \mathbf{s}_z . Führt man die Operationen in Gleichung (3.30) für alle Komponenten der im Beobachtersystem definierten Vektoren

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \vec{\Omega}_{IB} = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \vec{F}_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} F_{\text{ext},x} \\ F_{\text{ext},y} \\ F_{\text{ext},z} \end{bmatrix} \quad (\text{äußere Gesamtkraft})$$

aus, so ergibt sich für das dynamische Verhalten der beiden lateralen Richtungen x und y (vgl. [517])

$$F_{\text{ext},x} + 2m\Omega_z s_y y = m s_x^2 x + r_x s_x x + \left(\frac{1}{n_x} - m \left(\Omega_y^2 + \Omega_z^2 \right) \right) x + m \left(\Omega_x \Omega_y - s_z \Omega_z \right) y \quad (3.32)$$

$$F_{\text{ext},y} - 2m\Omega_z s_x x = m s_y^2 y + r_x s_y y + \left(\frac{1}{n_y} - m \left(\Omega_x^2 + \Omega_z^2 \right) \right) y + m \left(\Omega_x \Omega_y + s_z \Omega_z \right) x \quad (3.33)$$

Mit einer konstanten Drehrate ($s_z \Omega_z = 0$) und Drehraten mit deutlich geringeren Frequenzen als der angetriebenen Schwingung (Ω_x^2, Ω_y^2 und $\Omega_x \Omega_y$ vernachlässigbar klein) sowie geringen Amplituden der durch die Corioliskraft bedingten Schwingung ($2m\Omega_z s_y y$ vernachlässigbar klein) folgt

$$F_{\text{ext},x} = m s_x^2 x + r_x s_x x + \frac{1}{n_x} x \quad (3.34)$$

$$F_{\text{ext},y} - 2m\Omega_z s_x x = m s_y^2 y + r_x s_y y + \frac{1}{n_y} y \quad (3.35)$$

Geht man davon aus, dass die externe Gesamtkraft nur in den gezielt eingebrachten Kräften für die angetriebene Bewegung ausgeht ($F_{\text{ext},x} = F_{\text{antr},x}$ und $F_{\text{ext},y} = 0$), folgt in der komplexen Darstellung mit den Frequenzparametern der Laplace-Transformation nach Gleichung (3.11) analog zu Gleichungen (3.12) und (3.18) wie in Abbildung 3.1 b) vektoriell veranschaulicht:

$$\underline{F}_{\text{antr},x} = m s_x^2 \underline{x} + s_x r_x \underline{x} + \frac{1}{n_x} \underline{x} \quad (3.36)$$

$$\Leftrightarrow \underline{x} = \frac{\underline{F}_{\text{antr},x}/m}{s_x^2 + \frac{\omega_{0x}}{Q_x} s_x + \omega_{0x}^2} \quad (3.37)$$

$$-2m\Omega_z s_y \underline{x} = m s_y^2 \underline{y} + r_x s_y \underline{y} + \frac{1}{n_y} \underline{y} \quad (3.38)$$

$$\Leftrightarrow \underline{y} = -\frac{2\Omega_z s_x \underline{x}}{s_y^2 + \frac{\omega_{0y}}{Q_y} s_y + \omega_{0y}^2} \quad (3.39)$$

$$\Rightarrow \frac{\underline{y}}{\Omega_z} = -\frac{2s_x \underline{F}_{\text{antr},x}}{\left(s_y^2 + \frac{\omega_{0y}}{Q_y} s_y + \omega_{0y}^2 \right) \left(s_x^2 + \frac{\omega_{0x}}{Q_x} s_x + \omega_{0x}^2 \right) m} \quad (3.40)$$

mit

$$\omega_{0x} = \frac{1}{\sqrt{mn_x}} = \text{Resonanzfreq. in } x\text{-Richtung (Antrieb)} \quad (3.41)$$

$$Q_x = \frac{1}{\omega_{0x} n_x r_x} = \text{Resonanzgüte in } x\text{-Richtung} \quad (3.42)$$

$$\omega_{0y} = \frac{1}{\sqrt{mn_y}} = \text{Resonanzfreq. in } y\text{-Richt. (Messung)} \quad (3.43)$$

$$Q_y = \frac{1}{\omega_{0y} n_y r_y} = \text{Resonanzgüte in } y\text{-Richtung} \quad (3.44)$$

Fall c) – rotatorische Bewegung der Inertialmasse

Im Fall c) sei davon ausgegangen, dass das Moment \vec{M}_{antr} eine rotatorische Bewegung der Inertialmasse antreibt mit dem Drehimpuls \vec{L}_{antr} orthogonal zur Rotation des Beobachtersystems gegenüber dem Inertialsystem $\vec{\Omega}_{IB}$:

$$\vec{L}_{\text{antr}} = \Theta \mathbf{s}_B \vec{\varphi} \quad (3.45)$$

mit

$$\Theta = \begin{bmatrix} \Theta_x & 0 & 0 \\ 0 & \Theta_y & 0 \\ 0 & 0 & \Theta_z \end{bmatrix} = \text{Trägheitsmoment} \quad (3.46)$$

Die zu messende Drehrate sei zunächst als konstant angenommen ($\mathbf{s}_I \vec{\Omega}_{\text{mess}} = 0$) und im Beobachtersystem seien die Vektoren $\vec{\varphi}$ und \vec{M}_{antr} wie folgt definiert:

$$\vec{\varphi} = \begin{bmatrix} \varphi_x \\ \varphi_y \\ \varphi_z \end{bmatrix}, \quad \vec{M}_{\text{antr}} = \begin{bmatrix} M_{\text{antr},x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Die allgemein gültige Bewegungsgleichung für starre Körper besagt, dass die zeitliche Änderung des Drehimpulses \vec{L} bezüglich des Körperschwerpunkts gleich dem äußeren Moment \vec{M} um den Körperschwerpunkt ist:

$$\mathbf{s}_I \vec{L} = \vec{M} \quad (3.47)$$

Wendet man nun das Coriolis-Theorem nach Gleichung (3.24) unter Berücksichtigung der Drehrate $\vec{\Omega}_{IB}$ an, folgt:

$$\mathbf{s}_I \vec{L}_{\text{antr}} = \mathbf{s}_B \vec{L}_{\text{antr}} + \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{L}_{\text{antr}} \quad (3.48)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{s}_B \vec{L}_{\text{antr}} = \mathbf{s}_I \vec{L}_{\text{antr}} - \vec{\Omega}_{IB} \times \vec{L}_{\text{antr}} \quad (3.49)$$

Geht man davon aus, dass sich der Drehimpuls \vec{L}_{antr} in Bezug auf das Inertialsystem nicht ändert ($\mathbf{s}_I \vec{L} = 0$, lagestabil), so rotiert er in Bezug auf das Beobachtersystem ($\mathbf{s}_B \vec{L}_{\text{antr}} \neq 0$). Dieses Verhalten lässt sich innerhalb des Beobachtersystems durch ein Scheinmoment beschreiben, das *Coriolis-Moment* [435, 518] (Wirkung = Ursache \times Mittler):

$$\vec{M}_C = \vec{L}_{\text{antr}} \times \vec{\Omega}_{IB} \quad (3.50)$$

Dieses Moment beschreibt beispielsweise die Ursache für die Präzessionsbewegung des Kreisels. Es lässt sich auf die Coriolis-Kraft-Wirkung auf jedes Masseteilchen entsprechend (3.31) zurückführen.

Zur Betrachtung der einzelnen Raumrichtungen im Beobachtersystem geht \mathbf{s}_B über in \mathbf{s}_x , \mathbf{s}_y und \mathbf{s}_z . Bleibt der Drehimpuls im Inertialsystem lagestabil, folgt für einen angetriebenen Drehimpuls \vec{L}_{antr} in x -Richtung und eine zu messende Drehrate $\vec{\Omega}_{IB} = \vec{\Omega}_{\text{mess}}$ in z -Richtung

$$\vec{M}_C = \vec{L}_{\text{antr}} \times \vec{\Omega}_{\text{mess}} \quad (3.51)$$

$$= \begin{bmatrix} \Theta_x \mathbf{s}_x \varphi_x \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Theta_y \mathbf{s}_y \varphi_y \Omega_z \\ -\Theta_x \mathbf{s}_x \varphi_x \Omega_z \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ -\Theta_x \mathbf{s}_x \varphi_x \Omega_z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Weiterhin sei vereinfachend angenommen, dass nur eine Probemasse vorliege, wodurch das Trägheitsmoment Θ nach (3.46) für die Antriebs- ebenso wie für die Messfunktion bestimmend ist.

Es sei davon ausgegangen, dass die Rotationsschwingung um die x -Achse mit konstanter Amplitude angetrieben sei und dass die Rotationsschwingung um die y -Achse nur eine sehr geringe Amplitude aufweise. Damit seien die Rückwirkungen der Rotationsschwingungen um die y -Achse auf die um die x -Achse vernachlässigbar. Daraus folgt für das Aktionsprinzip in den beiden

lateralen Richtungen x und y unter Einwirken des Coriolismoments \vec{M}_C wie in Abbildung 3.1 c) vektoriell veranschaulicht

$$M_{\text{antr},x} \vec{e}_x = \Theta_x s_x^2 \varphi_x \vec{e}_x + r_{\text{rot},x} s_x \varphi_x \vec{e}_x + \frac{1}{n_{\text{rot},x}} \varphi_x \vec{e}_x \quad (3.53)$$

$$\vec{M}_C = -\Omega_z \Theta_x s_x \varphi_x \vec{e}_y = \Theta_y s_y^2 \varphi_y \vec{e}_y + r_{\text{rot},y} s_y \varphi_y \vec{e}_y + \frac{1}{n_{\text{rot},y}} \varphi_y \vec{e}_y \quad (3.54)$$

In der komplexen Darstellung folgt mit den Frequenzparametern der Laplace-Transformation nach Gleichung (3.11) analog zu Gleichungen (3.12) und (3.18):

$$\underline{M}_{\text{antr},x} = \Theta_x s_x^2 \underline{\varphi}_x + r_{\text{rot},x} s_x \underline{\varphi}_x + \frac{1}{n_{\text{rot},x}} \underline{\varphi}_x \quad (3.55)$$

$$\Leftrightarrow \underline{\varphi}_x = \frac{\underline{M}_{\text{antr},x} / \Theta_x}{s_x^2 + \frac{\omega_{\text{rot},0x}}{Q_{\text{rot},x}} s_x + \omega_{\text{rot},0x}^2} \quad (3.56)$$

$$-\Omega_z \Theta_x s_x \underline{\varphi}_x = \Theta_y s_y^2 \underline{\varphi}_y + r_{\text{rot},y} s_y \underline{\varphi}_y + \frac{1}{n_{\text{rot},y}} \underline{\varphi}_y \quad (3.57)$$

$$\Leftrightarrow \underline{\varphi}_y = -\frac{\Omega_z s_x \underline{\varphi}_x \Theta_x / \Theta_y}{s_y^2 + \frac{\omega_{\text{rot},0y}}{Q_{\text{rot},y}} s_y + \omega_{\text{rot},0y}^2} \quad (3.58)$$

$$\Rightarrow \frac{\underline{\varphi}_y}{\Omega_z} = -\frac{s_x \underline{M}_{\text{antr},x}}{\left(s_x^2 + \frac{\omega_{\text{rot},0x}}{Q_{\text{rot},x}} s_x + \omega_{\text{rot},0x}^2 \right) \left(s_y^2 + \frac{\omega_{\text{rot},0y}}{Q_{\text{rot},y}} s_y + \omega_{\text{rot},0y}^2 \right) \Theta_y} \quad (3.59)$$

mit

$$\omega_{\text{rot},0x} = \frac{1}{\sqrt{\Theta_x n_{\text{rot},x}}} = \text{Resonanzfreq. in } x\text{-Richtung (Antrieb)} \quad (3.60)$$

$$Q_{\text{rot},x} = \frac{1}{\omega_{\text{rot},0x} n_{\text{rot},x} r_{\text{rot},x}} = \text{Resonanzgüte in } x\text{-Richtung} \quad (3.61)$$

$$\omega_{\text{rot},0y} = \frac{1}{\sqrt{\Theta_y n_{\text{rot},y}}} = \text{Resonanzfreq. in } y\text{-Richtung (Messung)} \quad (3.62)$$

$$Q_{\text{rot},y} = \frac{1}{\omega_{\text{rot},0y} n_{\text{rot},y} r_{\text{rot},y}} = \text{Resonanzgüte in } y\text{-Richtung} \quad (3.63)$$

Eine detailliertere Beschreibung der theoretischen Zusammenhänge liefert [517].

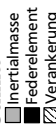
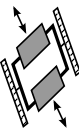
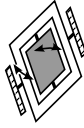

Ebenso wie bei den Beschleunigungssensoren stellen die Tabellen 3.3 und 3.4 mikromechanische Drehratensensoren klassifiziert nach Funktionsprinzip und Fertigungsverfahren gegenüber. Ausgehend von [435] (S. 67 und 68) und [436, 498], ist die Darstellung erweitert um Literaturstellen und soweit recherchierbar um Antriebs- und Messprinzipien. Auch bei den Drehratensensoren gehen die ersten Veröffentlichungen detailliert auf die Grundkonfigurationen ein, spätere Beiträge beschreiben häufig Verfahren zum Entkoppeln der Antriebs- und Mess-Inertialmassen [588] sowie eine vorteilhafte Kombination von Elektronik und mikromechanischem Bauelement.

Während anfangs noch eine Vielzahl der Antriebsprinzipien (elektrostatisch (*elst*), piezoelektrisch (*peleA*), elektrodynamisch (*edyn*), induktiv (*ind*), elektrothermomechanisch (*elth*)) Anwendung in Drehratensensoren fand, dominiert heute das elektrostatische Antriebsprinzip. Auch das Messprinzip entwickelte sich aus den im Abschnitt 3.1.1 genannten Gründen von kapazitiv (*kap*), piezoelektrisch (*pele*), piezoresistiv (*pres*), optisch (*opt*) und elektromagnetisch (*emag*) im Wesentlichen zu kapazitiv.

Technologisch dominiert die Silizium-Oberflächen-Mikromechanik den Markt und die wissenschaftlichen Beiträge, während die Silizium-Volumen-Mikromechanik für besonders hohe Empfindlichkeiten zum Einsatz kommt. Alternative Ansätze, basierend auf galvanischer Abformung oder Federelemente aus Silikon [592], finden sich vor allem in wissenschaftlichen Beiträgen.

Will man die Drehrate etwa für die Fahrdynamikregelung von Kraftfahrzeugen bestimmen, sind die Anforderungen wesentlich niedriger als bei Flugregelungen für Marschflugkörper oder bei der Inertial-Navigation. Gerade bei letzterer Anwendung muss das Ausgangssignal des Drehratensensors mehrfach über die Zeit integriert werden, weshalb sehr hohe Anforderungen u. a. an den Nullpunktfehler und das Rauschverhalten des Bauteils bestehen. Typische Charakteristika kommerzieller Drehratensensoren sind je nach Einsatzbereich [498]:

Tabelle 3.4: Fortsetzung der Tabelle 3.3: Mikromechanische Drehratensensoren aufgeführt nach Funktionsprinzip und Fertigungsverfahren. Antriebsprinzipien: elektrostatisch (*elst*), piezoelektrisch (*pelA*), elektrodynamisch (*edyn*), induktiv (*ind*), elektrothermomechanisch (*elth*). Messprinzipien: kapazitiv (*kap*), piezoelektrisch (*pele*), piezoresistiv (*pres*), optisch (*opt*), elektromagnetisch (*emag*).

Seitenansicht im Schnitt 			
Primärbewegung (Pfeile)	Lineare Schwingung zweier Inertialmassen, gegenphasig		
Sekundärbewegung	Lineare Schwingung	Drehschwingung aus Substratebene	Drehschwingung in Substratebene
Si-Volumen-Mikromechanik/hybrid (z. B. mit Glas oder Quarz)	<i>edyn pres</i> [567], <i>edyn kap</i> [568], <i>elst kap</i> [557, 569]	<i>elst kap</i> [532, 570, 572–574], [575]	
Oberflächen-Mikromechanik (Si u. ä., keine Metalle, keine Polymere)		<i>elst kap</i> [580], <i>elth kap</i> [581]	<i>elst kap</i> [435, 552, 582–589], [579]
LIGA u. ä.		<i>elst kap</i> [577, 590]	<i>pelA kap</i> [591]

- Arbeitsbereich bzgl. Drehrate in $^{\circ}/s$
- Arbeitsbereich bzgl. Bandbreite in Hz
- Empfindlichkeit in $\frac{V}{^{\circ}/s}$
- Fehler der Empfindlichkeit in %
- Auflösung in $\frac{^{\circ}/s}{\sqrt{Hz}}$ bzw. $\frac{^{\circ}/h}{\sqrt{Hz}}$ oder $\frac{^{\circ}}{\sqrt{h}}$ (random angle walk)
- Nullpunktfehler in $^{\circ}/h$ (zero rate output)
- Überlastfestigkeit in g für die Einwirkungsdauer 1 ms

3.1.3 Multisensoren für Beschleunigung und Drehrate

Zur Messung aller sechs Freiheitsgrade eines frei im Raum bewegten Körpers kombiniert man drei Beschleunigungs- und drei Drehraten-Sensoren zu einer inertialen Messeinheit („inertial measurement unit“, IMU). Die Integration der Messwerte liefert die Position des Körpers im Raum. IMUs kommen in der Robotik ebenso wie bei der Unterstützung satellitengestützter Navigation zum Einsatz. In der Automobiltechnik steigen die Anforderungen an Sicherheitssysteme und an die Navigationsgenauigkeit stetig. Selbst in einigen günstigen Modellhubschraubern unterstützen mehrachsige Inertialsensoren die Flugstabilisation [593]. Daher ist der Markt der mehrachsigen Inertialsensoren in den letzten Jahren stetig gewachsen.

Für günstige inertielle Messeinheiten in der Massenanwendung platziert man mehrere Sensoreinheiten nebeneinander auf einem Substrat. Die Geometrie-Einschränkungen durch die gemeinsame Fertigung in einer Ebene bedingen Abweichungen in den Empfindlichkeiten und Auflösungen der unterschiedlichen Achsen.

Ein grundsätzliches Problem ergibt sich durch die mehrfache Integration der Messwerte [594]. Nullpunktfehler und Nichtlinearitäten der Empfindlichkeiten führen zu erheblichen Abweichungen der Lage im Raum in relativ kurzer Zeit. Der mehrfache Aufbau der Messeinheiten in verschiedenen Bauarten kann das Problem mindern, steigert aber die Kosten. Das Problem ist vor allem dort wesentlich, wo große Intervalle ohne Satellitensignale zur Positionsbestimmung überbrückt werden müssen. Vor der Einführung der mikromechanischen Inertialsensoren hat man Systeme mit großen und sehr

teuren Gyroskope gebaut (*navigation platform*), mit denen man die Drehung direkt messen konnte und somit eine Integrationsstufe weniger benötigte als bei den hier beschriebenen *strapdown*-Systemen [594].

3.2 Inertialkraftdetektion mit senkrechten 1-D-Federelementen

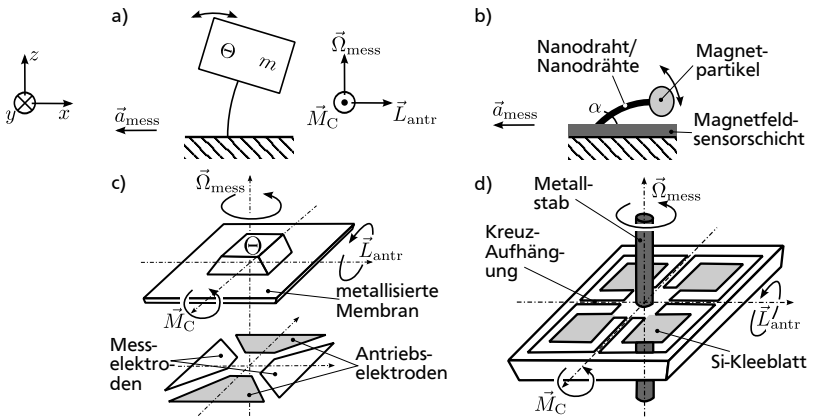


Abbildung 3.4: Inertialsensoren in Bezug auf senkrechte 1-D-Federelemente: a) Eigener Ansatz nach dem Prinzip des inversen Pendels, b) Nanodraht / Nanodrähte als Federelement nach [183], c) Explosionsdarstellung: Aufhängung mit einer Membran nach [595], d) Aufhängung an Kreuzstruktur nach [572, 574].

Hier soll ein neuartiger Ansatz betrachtet werden, über den in der Literatur bisher außer in den eigenen Veröffentlichungen nicht berichtet wurde. Grundsätzlich handelt es sich um ein inverses Pendel – einen senkrecht verankerten, langen, dünnen und flexiblen Stab, an dessen Ende die Inertialmasse befestigt ist, vgl. Abbildung 3.4 a). Diese Anordnung kann zur Messung lateraler Beschleunigungen ebenso wie zur Messung vertikaler Drehraten dienen. Bei einer lateralen Beschleunigung \vec{a}_{antr} schlägt das Pendel aus und der Ausschlag kann gemessen werden. Bei einer Drehrate $\vec{\Omega}$ um die z -Achse und einer angetriebenen, pendelnden Rotation um die x -Achse (\vec{L}_{antr}) kann die resultierende pendelnde Rotation (\vec{M}_C) um die y -Achse gemessen werden.

Der einzige bekannte mikromechanische Inertialsensor mit senkrechten Federelementen ist bisher in einer Patentschrift für einen Beschleunigungssensor beschrieben [183] und es existiert kein wissenschaftlicher Beitrag dazu, vgl. Abbildung 3.4 b). Unter einem Winkel α gegenüber der Substratoberfläche steht mindestens ein Nanodraht aus der Ebene heraus und trägt an dessen Spitze magnetische Partikel. Draht und Partikel bilden die Inertialmasse, sodass sich bei Beschleunigungen der oder die Drähte verbiegen und sich das Magnetfeld auf der Substratoberfläche ändert. Die Messung der Magnetfeldänderung gibt Rückschluss auf die Beschleunigung. Die wenig konkrete Beschreibung der Patentschrift geht weder auf Realisierungen des Beschleunigungssensors noch auf die Einsatzmöglichkeit der Anordnung als Drehratensensor ein.

Der in den vorangehenden Abschnitten aufgeführte Stand der Technik beinhaltet mehrere mikromechanische Inertialsensoren mit planaren, flächigen Federelementen. So nutzt auch der in [595] beschriebene Drehratensensor eine Si-Volumen-mikromechanisch gefertigte Inertialmasse mit dem Trägheitsmoment Θ , die an einer planaren, metallisierten Membran aufgehängt ist. Sie kann somit in zwei lateralen Raumrichtungen mit vergleichbaren Federeigenschaften kippen, vgl. Abbildung 3.4 c). Die primäre Bewegung in x -Richtung wird elektrostatisch angetrieben, die der vertikalen Drehrate proportionale Rotation in y -Richtung kapazitiv erfasst. Damit ähnelt das Verhalten der Inertialmasse dem des inversen Pendels im Drehraten-Modus, wobei die federnde Aufhängung gänzlich anders gestaltet ist. Durch die Membran-Feder und die Fertigungsmethode der Inertialmasse weist dieser Sensor einen großen Chipflächenbedarf auf.

Einige Federstrukturen der in den Tabellen 3.1 - 3.4 dargestellten Arbeiten können als laterale 1-D-Federlemente bezeichnet werden: sie bestehen aus mehreren Mikrometer langen Bändern, die einige Nanometer dick und breiter als dick sind. Sie sind lateral in der Substratebene angeordnet und agieren als Biege- bzw. Torsionsfedern. Auf diesem Prinzip beruht auch der in [572, 574] beschriebene Drehratensensor mit einer „vierblättrigen Kleeblatt-Struktur“, vgl. Abbildung 3.4 d). Der zentrale Punkt der beweglichen Anordnung ist über ein Kreuz mit dem festen Rahmen verbunden. Die Elemente des Kreuzes bestehen aus langen, dünnen Bändern. So können alle mit dem zentralen Punkt verbundenen Bauteile mit definierten Federeigenschaften in zwei lateralen Raumrichtungen kippen. Zur Erhöhung des Trägheitsmoments um die lateralen Achsen ist im zentralen Punkt ein vertikaler, biegesteifer Metallstift aufgehängt. In der Ebene ist an diesem zen-

tralen Punkt in jedem Sektor eine Platte befestigt – ein „Silizium-Kleeblatt“. Elektrostatisch angetrieben rotiert die innere Anordnung mit dem Drehimpuls \vec{L}_{antr} in x -Richtung. Durch das Coriolis-Moment \vec{M}_C rotiert sie in y -Richtung proportional zur vertikalen Drehrate $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ und die resultierende Auslenkung wird kapazitiv erfasst. Bei vergleichbaren Federeigenschaften ist der Chipflächenbedarf des Kreuzes mit dem senkrechten Metallstift wesentlich geringer als bei [595]. Allerdings setzt auch die „vierblättrige-Kleeblatt-Struktur“ keine senkrechten Federelemente ein und der Metallstift muss nachträglich montiert werden.

Vergleichbare kreuzförmige Aufhängungen setzen auch andere Arbeiten ein [443, 447], wobei dort der zentrale Bereich fixiert und der äußere beweglich ist, vgl. Abbildung 3.5 a) und b). Der dreidimensionale Beschleunigungssensor in [443] nutzt einen umlaufenden Rahmen als Inertialmasse und piezoresistive Widerstände auf den Balken der Aufhängung zur Auslenkungsmessung. Bei einer vertikalen Beschleunigung in z -Richtung senkt sich der Rahmen rundum gleichmäßig ab, bei einer lateralen Beschleunigung in x - oder y -Richtung verkippt der Rahmen. Die Verkipfung kommt durch die Aufhängung oberhalb der Masseschwerpunkte zustande und ähnelt der des inversen Pendels in Abbildung 3.4 a). Die Aufhängung unterhalb der Masseschwerpunkte in [447] führt zur umgekehrten Verkipfung, ansonsten aber zum gleichen Verhalten. Die Auslenkungsmessung erfolgt in diesem Ansatz kapazitiv.

Der in [596] beschriebene Ansatz basiert auf zwei parallelen Bonddrähten „Loops“ aus unterschiedlichen Materialien, vgl. Abbildung 3.5 c). Die Drähte selbst agieren sowohl als Federn als auch als Masseelemente, vergleichbar mit der oben beschriebenen Patentschrift [183]. Der Golddraht lenkt sich bei einer Beschleunigung stärker aus als der Aluminiumdraht, sodass sich der Abstand zwischen den beiden Drähten ändert. Zur Abstandsmessung nutzt der Ansatz die elektromagnetische Kopplung zwischen den beiden Drähten.

Strukturell am nächsten zum vorgeschlagenen Konzept des inversen Pendels mit senkrechten Federelementen ist die Struktur in [597], vgl. Abbildung 3.5 d). Dort ist ein Masseblock aus mit Ferrit gefülltem Silikon (Polydimethylsiloxan, PDMS) durch einem darunter angeordneten Silikon-Stößel aufgehängt. Der Silikon-Stößel ist sehr flexibel, sodass sich der Masseblock nach dem Prinzip des inversen Pendels bewegen kann. Die Auslenkung wird durch magnetoresistive Sensorschichten unterhalb der Silikon-Strukturen

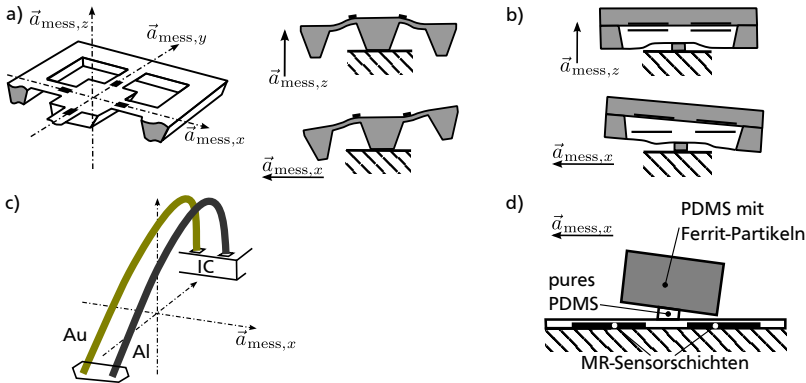


Abbildung 3.5: Beschleunigungssensoren in Bezug auf senkrechte 1-D-Federelemente: a) Aufhängung an Kreuzstruktur und Massenschwerpunkt unterhalb der Aufhängung nach [443], b) Aufhängung an Kreuzstruktur und Massenschwerpunkt oberhalb der Aufhängung nach [447], c) Parallele Bonddrähte aus unterschiedlichen Materialien [596], d) Aufhängung auf Silikon-Stößel [597].

erfasst. Eine ähnliche Aufhängung aus Silikon nutzt das in [592] präsentierte Konzept für einen auf Formschwingung basierenden Drehratensensor.

Die vorangehenden Kapitel haben die Fertigungsverfahren und Anwendungen metallischer Mikro- und Nanodrähte aufgeführt. Der folgende Abschnitt knüpft daran an und beschreibt die Eigenschaften dieser Strukturen für die Anwendung als 1-D-Federelemente in Inertialsensoren vor dem Hintergrund des Funktionskonzepts eines inversen Pendels nach Abbildung 3.4 a).

3.2.1 Eigenschaften eindimensionaler Federelemente

Silizium und Silizium-Verbindungen kommen in mikromechanischen Bauelementen sehr häufig als Federelemente zum Einsatz, da sie eine hohe Langzeitstabilität mit geringer Temperaturabhängigkeit und hohen Resonanzgüten verbinden (z. B. Biegezug-Resonatoren im Vakuum mit $Q = 10^8$) [598, 599]. Um senkrechte 1-D-Federelemente aus Silizium herzustellen, eignen sich subtraktive anisotrope Plasmaätzverfahren (Deep Reactive-Ion Etching, DRIE: Boschprozess [600] oder kryogene Verfahren [601]). Ei-

ne Seite der aus dem Silizium-Vollmaterial freigestellten Faser ist dadurch mit dem Substrat verbunden, die andere freistehend. Das freie Ende muss zur Verwendung als Federelement mit der Inertialmasse bzw. der Verankerung verbunden werden, z. B. durch Kleben, vgl. Abbildung 3.6 a). Eine solche 2-Chip-Lösung bringt beim Fügen der beiden Teile mehrere Herausforderungen mit sich:

1. Bei der Ausrichtung der beiden Teile zueinander (Alignment) ist darauf zu achten, dass das zweite Teil zentriert auf der Faser platziert ist und die Faser im Moment des Fixierens nicht ausgelenkt ist. Ansonsten können Asymmetrien zu erheblichen Fehlern bei der Funktion des Systems führen.
2. Es besteht die Gefahr, die sehr empfindlichen Fasern bei der Handhabung zu beschädigen.
3. Unstetigkeiten im Materialübergang (unterschiedliche Materialien durch Bindemittel, Zwischenschichten usw.) sind potentielle Fehlstellen, die im Betrieb des Bauteils zum Schaden führen können.

Für eine zuverlässige Verbindung der Faser mit dem zweiten Teil stellen anodisches Bonden, Silicon Direct Bonding (SDB) oder Silicon Fusion Bonding (SFB) Alternativen dar, wobei dann ein Teil aus Silizium und eins aus Glas bzw. mit SiO_2 beschichtetem Silizium bestehen muss. Dies schränkt die Dichte der Materialien auf den Bereich $2,3 - 2,7 \text{ g/cm}^3$ ein.

Das additive Verfahren *galvanische Abscheidung* ermöglicht das Abscheiden des zweiten Teils direkt auf der Faser, sodass eine monolithische Fertigung (1-Chip-Lösung) möglich wird, vgl. Verfahren nach eigener Patentanmeldung in Abbildung 3.6 b). Dort wird zunächst die Faser in einer Galvanoform aus Photoresist abgeschieden (i). Die darauf strukturierte dünne Photoresistschicht weist am oberen Ende der Faser eine Öffnung auf. Der folgende Beschichtungsprozess (PVD) verbindet durch eine Metallschicht das obere Ende der Faser elektrisch mit der Oberfläche der dünnen Photoresistschicht (ii). Die anschließende galvanische Abformung fertigt das zweite Teil – die Inertialmasse oder wie in Abbildung 3.6 den Träger des Mikrospiegels – direkt am Ort der späteren Verwendung aus (iii). Somit können Faser, Metallschicht und zweites Teil aus dem gleichen Metall bestehen. Das abschließende Entfernen des Photoresists stellt die metallischen Bauteile frei, sodass die Faser als 1-D-Federelement und Träger des zweiten Teils fungieren kann.

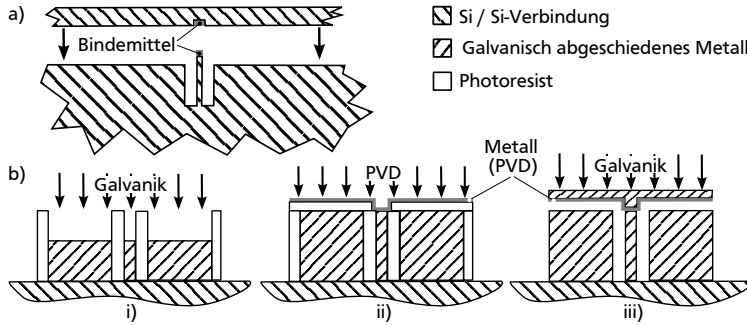


Abbildung 3.6: Verbindung des 1-D-Federelements mit einem beweglichen Bauteil – hier einem Mikrospiegel: a) Klebeverbindung mit Bindemittel nach [287], b) Herstellung aus einem Metall nach eigenem Patent [2, 4]: i) Galvanische Abscheidung der Faser im Zentrum, ii) Metallische Zwischenschicht aufbringen (PVD), iii) Galvanische Abscheidung des Mikrospiegelträgers, Photoresist entfernen.

Aus Untersuchungen an metallischen Mikrostrukturen ist bekannt, dass mechanisch beanspruchte metallische Bauteile eine eingeschränkte Langzeitstabilität aufweisen, z. B. [602–606]. Meist werden zur Untersuchung Metallfilme mit PVD oder galvanischer Abscheidung erzeugt, jedoch nicht mit definiert nanokristallinem Gefüge. Das Verhalten des metallischen Bauteils hängt jedoch unter anderem wesentlich von dessen Zusammensetzung, den Korngrößen (gleichbedeutend mit Kristallitgrößen) und den Korngrenzen ab. Ein gutes Beispiel für die Auswirkungen der Korngröße auf die Härteänderung von reinem Kupfer ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Bei sehr kleinen Proben lässt sich ein Zugversuch nicht realisieren, über die Härte aus einem Druckversuch jedoch die Streckgrenze σ_y abschätzen mit $\sigma_y \approx H_{\text{Vickers}}/3$. Für polykristallines Metall mit Korngrößen im Mikrometerbereich gilt das Hall-Petch-Verhalten [388]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}} \quad (3.64)$$

mit

d = durchschnittliche Korngröße des Metalls $[d] = \text{m}$

σ_0 = Streckgrenze bei sehr großer Korngröße $[\sigma_0] = \text{Pa}$

k = Proportionalitätskonstante $[k] = \frac{\text{Pa}}{\sqrt{\text{m}}}$

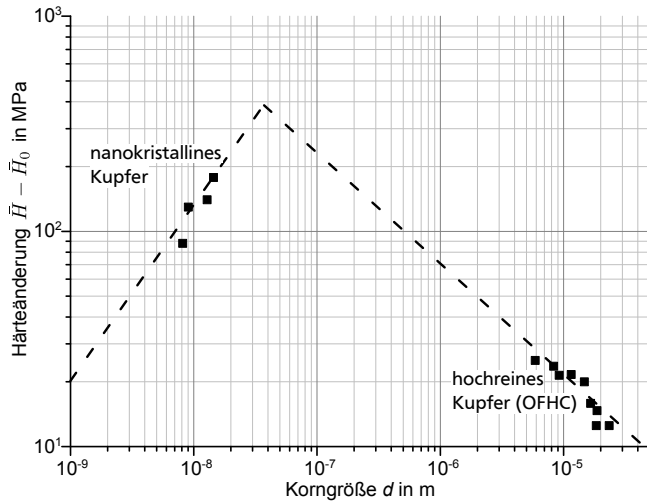


Abbildung 3.7: Härteerhöhung in Abhängigkeit der Korngröße für reines Kupfer (Messwerte Vickershärte HV 0,2 (nanokristallin) bzw. HV 0,3 (hochrein, „normale“ Korngröße) nach [607], Darstellung nach [608] (Bezugsgröße: sehr grobkristallines Kupfer mit $\bar{H}_0 \approx 50$ MPa).

Mit sinkender Korngröße steigt die Streckgrenze – feinkristallines Metall ist härter als grobkristallines. Unterschreitet die Korngröße eine nanoskalige Abmessung (bei reinem Kupfer liegt die Grenze bei etwa 50 nm), kehrt sich das Verhalten um und das Metall wird weicher je feinkristalliner es wird. Die Gründe dafür werden in der Literatur widersprüchlich diskutiert [608–612].

Wenn die äußeren Abmessungen der MEMS-Struktur ähnliche Größen wie charakteristische Längen der Gefügestruktur (z. B. die Korngröße) erreichen, finden Wechselwirkungen statt, die noch Gegenstand der Forschung sind [613–616]. Insbesondere metallische Nanodrähte sind hier von Interesse, da ihre Querschnitte kleiner als der eines kreisförmigen Versetzungsrings im Metall (dislocation loop) sein können. Dadurch konzentrieren sich die Versetzungen an der Oberfläche der Nanodrähte und die Drähte sind im Inneren theoretisch perfekt. Die Nanodrähte weisen eine hohe mechanische Stabilität auf und ihre theoretischen Eigenschaften [617, 618] sind vor allem in monokristallinem Gefüge herausragend [619].

Der experimentelle Nachweis an metallischen Nanodrähten ist aufwendig zu realisieren, da Oxidschichten auf den Nanodrahtoberflächen einen wesentlichen Einfluss haben. Die Arbeit [111, 620] zeigt, dass Wolfram-Submikrodrähte mit Durchmessern größer 100 nm Elastizitäts-Moduln wie beim Volumenmaterial aufweisen und keine Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser haben. Auf das Verhalten anderer Metalle gehen die folgenden Veröffentlichungen ein [621–623]. In Abbildung 3.8 a) ist ein einseitig aufgehängter W-Submikrodraht dargestellt, der mit einer durch Elektronenstrahl-lithographie und PVD strukturiert aufgetragenen Gold-Schicht kontaktiert ist. Er ist einseitig aufgehängt präpariert durch einen Schnitt mit dem fokussierten Ionenstrahl (FIB) auf einem SiO₂/Si-Substrat. Die Bildfolge in Abbildung 3.8 b) aus einem Video zeigt wie elastisch sich der Draht bei Raumtemperatur biegen lässt, auch nach mehreren Be- und Entlastungszyklen – ein ungewöhnliches Verhalten für das spröde Material Wolfram. Auch die *Duktilität* erweist sich als sehr hoch, denn die Drähte zeigen eine große Bruchdehnung [388]:

$$\varepsilon_{\text{br}} = \frac{l_{\text{br}} - l_0}{l_0} \quad (3.65)$$

mit

ε_{br} = Bruchdehnung	$[\varepsilon_{\text{br}}] = 1$
l_{br} = Länge bei Bruch	$[l_{\text{br}}] = \text{m}$
l_0 = ursprüngliche Länge	$[l_0] = \text{m}$

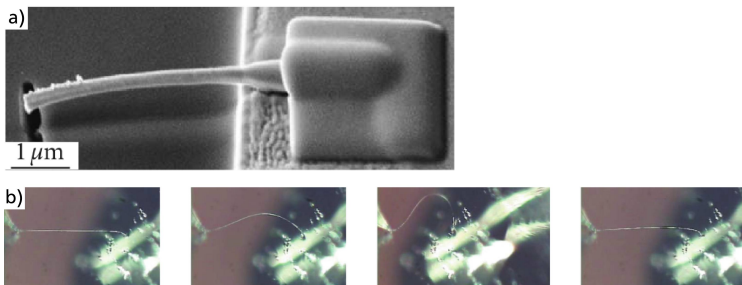


Abbildung 3.8: Aufnahmen von Wolfram-Submikrodrähten mit Durchmessern zwischen 100 nm und 1 µm aus [111]: a) einseitig aufgehängt und mit FIB präpariert, b) optische Aufnahmen aus Video mit ca. 100 µm langem Draht (der Draht ist durch Beugungsphänomene sichtbar).

Hier zeigt sich, dass Eigenschaften von mikro- und nanostrukturierten Metallen noch nicht vollständig ergründet sind und Potential für MNI-Systeme aufweisen. Beispielsweise lassen sich senkrechte Drähte mikro- und nanostrukturiert galvanisch abscheiden, vgl. [152] und Anhang C.2.3. So ermöglicht die galvanische Abscheidung das gezielte Einstellen der Gefügestruktur sowie Materialdichten im Bereich von beispielsweise $8,9 \text{ g/cm}^3$ für Nickel bis $19,3 \text{ g/cm}^3$ für Gold.

Um die Eigenschaften eindimensionaler Federelemente aus Silizium und aus Metallen miteinander vergleichen zu können, seien Dichte ρ , Elastizitäts-Modul E und die Fließgrenze (Streckgrenze $\sigma_{y,\text{Metall}}$ bzw. Bruchfestigkeit $\sigma_{\text{br,Si}}$) als Belastbarkeitsgrenze für unveränderte Federeigenschaften heran gezogen, vgl. Tabelle 3.5. Wie in Abbildung 3.4 a) und 3.6 b) dargestellt, zielt der eigene Ansatz auf eine Fertigung von 1-D-Federelement und Inertialmasse aus einem Material ab. Daher spielt die Dichte eine wesentliche Rolle, denn sie geht bei konstantem Volumen des Inertialmassekörpers linear in dessen Masse ein. Das Elastizitäts-Modul beschreibt die elastischen Federeigenschaften des Werkstoffs, wobei die Nachgiebigkeit der Feder n mit sinkendem Elastizitäts-Modul ansteigt. Daher sind ein geringes Elastizitätsmodul E und eine hohe Dichte ρ gut geeignet für ein Feder-Masse-System mit hohen Auslenkungen bei geringem Bauvolumen. Aus diesem Grund ist in Abbildung 3.9 der Faktor ρ/E in Abhängigkeit der Fließgrenze σ aufgetragen.

Tabelle 3.5: Eigenschaften von Materialien für 1-D-Federelemente.

Material	Dichte ρ in g/cm^3	Elastizitäts-Modul E in GPa	Fließgrenze σ in MPa
Cu [624]	8,96	129,8 (polykristallin)	54 (weich), 270 (hart)
Ni [624]	8,9	199,5 (polykristallin)	150 (weich), 480 (hart)
Au [624]	19,30	78,5 (polykristallin)	205 (hart)
Si (polykristallin)	2,34 [624]	165 ([625] S. 74)	3000 ([625] S. 74)

Wie im Abschnitt 3.1 dargestellt, ist die Resonanzgüte ein wichtiges Kriterium für mechanisch schwingende Strukturen in Mikrosystemen. Mikrostrukturierte Federzungen aus Silizium- und Silizium-Verbindungen sind denen aus Metallen um mehrere Größenordnungen überlegen, jedoch zeigen hochfrequente Untersuchungen an Submikro- und Nanodrähten im Vakuum eine

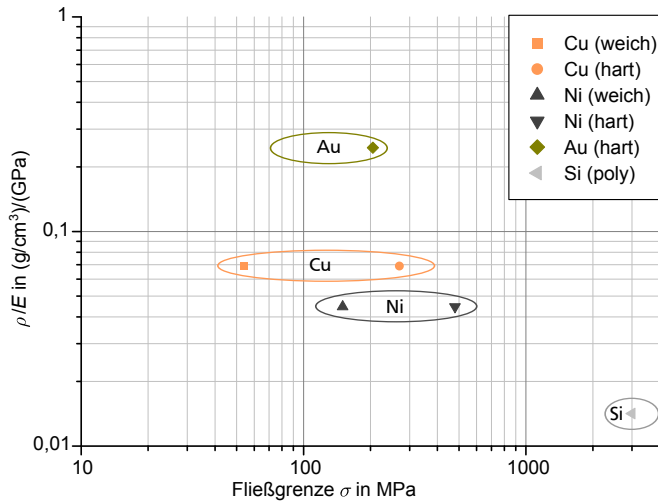


Abbildung 3.9: Dichte in Abhängigkeit der Fließgrenze entsprechend der Werte in Tabelle 3.5: Ein großer Wert für ρ/E führt zu hohem Ausschlag des Messelements, ein großer Wert für σ führt zu robustem Messelement.

Annäherung der beiden Materialien. Einkristalline Silizium-Nanodrähte zeigen eine Güte von 13100 bei 80 MHz bzw. 2000-2500 bei 200 MHz [626]. Metallische Submikrodrähte zeigen verhältnismäßig große Resonanzgüten bei 4 MHz [627, 628]: 600-900 für Au und 1100-1300 für Rh. Ebenso zeigen diese Submikrodrähte geringere Elastizitäts-Moduln als Volumenmaterial: 44 ± 12 GPa für Au (Volumen-Wert: 82 GPa) und 222 ± 70 GPa (Volumen-Wert: 379 GPa).

Die mechanische Charakterisierung von Nanomaterialien ist aufwendig und birgt viele Fehlerquellen [111, 186, 629–632]. Die Präparation mit FIB oder EBID kann zur Kontamination mit Kohlenstoffschichten führen, sodass ein Massebelag auf den Nanostrukturen entsteht sobald sich ihr effektives Elastizitäts-Modul und ihre effektive elektrische Leitfähigkeit ändern. Zudem kann lokaler Hitzeeintrag beim Bearbeiten zu dauerhaften mechanischen Spannungen führen. Darüber hinaus spielt die Oberflächenbeschaffenheit (Topologie, Gefügestruktur, Oxidationsstufen..) durch das hohe Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis eine entscheidende Rolle.

Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, konnten bereits viele Anwendungen mit senkrechten metallischen Drähten demonstriert werden. Vor allem in der Aufbau- und Verbindungstechnik und dort bei „Nanorasen“-Bondverbindungen sowie bei Silizium-Durchkontaktierungen (Through Silicon Via, TSV) sind das industrielle Interesse sowie die Expertise zum mechanischen Verhalten der Drähte hoch. Die eingebetteten Metalldrähte der TSV-Technologie sind so zuverlässig, dass sie bereits in der Großserienfertigung zum Einsatz kommen. Jedoch konnte wie am Anfang des Abschnitts 3.2 dargestellt, keine Veröffentlichung zu einem Inertialsensor mit senkrechten metallischen 1-D-Federelementen über die eigenen Arbeiten hinaus gefunden werden. Daher soll der folgende Abschnitt den eigenen Ansatzes nach Abbildung 3.4 a) detaillierter vorstellen und damit die Grundlage für die Modellbildung im folgenden Kapitel bilden.

3.2.2 Eigenes Funktionskonzept

Bisherige mechanische Inertialsensoren weisen ausnahmslos in der Substratebene ausgebreitete Federstrukturen auf. Dies schränkt die Gestaltungsfreiheit für den Aufbau der Sensoren ein und führt zu einem erheblichen Chipflächenbedarf allein für die Federstrukturen. Der hier dargestellte Ansatz soll senkrechte Fasern als Federelemente verwenden und damit eine Lösung für geringen Chipflächenbedarf – *minimal footprint* – bieten. Er soll den Weg zum Einsatz senkrechter Nanofasern in Inertialsensoren eröffnen.

Die in Abbildung 3.10 a) dargestellte Struktur funktioniert nach dem Prinzip des inversen Pendels: eine laterale Beschleunigung \vec{a}_{mess} führt durch die flexible Aufhängung der senkrechten Biegefeder zur Auslenkung der Inertialmasse. Liegt der Schwerpunkt S der Inertialmasse wie dargestellt deutlich oberhalb der Biegefeder, kippt die Inertialmasse entgegen der Beschleunigung, vgl. Abbildung 3.5 b) und d). Läge der Schwerpunkt der Inertialmasse deutlich unterhalb des oberen Endes von der Biegefeder, kippte die Inertialmasse in Richtung der Beschleunigung, vgl. Abbildung 3.5 a). Die Kippung führt zu Abstandsänderungen zwischen Substrat und Inertialmasse, die wiederum zu Kapazitätsänderungen zwischen den Elektroden auf dem Substrat und der metallischen Inertialmasse führen. Ist die Inertialmasse als Zentralelektrode verschaltet, lässt sich die Auslenkung differentiell kapazitiv erfassen. Abbildung 3.10 a) stellt also eine Struktur für einen einaxigen Beschleunigungssensor dar.

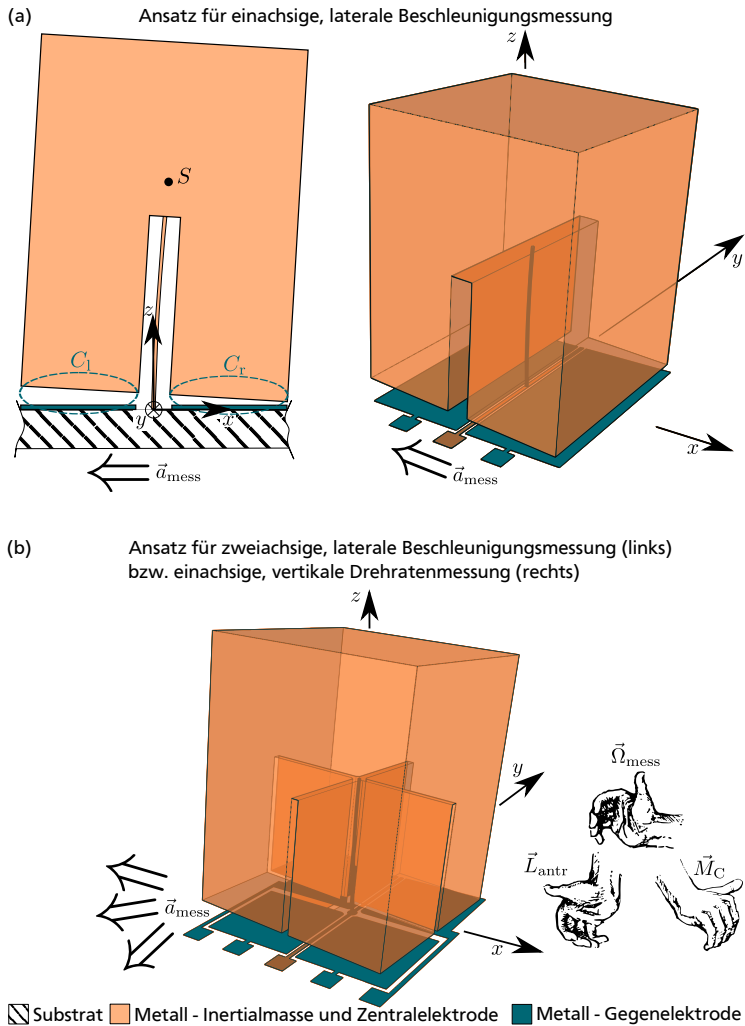


Abbildung 3.10: Eigener Ansatz für Inertialsensorstrukturen mit senkrechten 1-D-Federelementen: a) Einachsige Konfiguration: 2D-Skizze in seitlicher Schnittansicht (links) und 3D-Skizze in schräger Draufsicht; b) 3D-Skizze in schräger Draufsicht einer zweiachsigen Konfiguration mit zwei Anwendungsfällen links und rechts.

Die in Abbildung 3.10 b) dargestellte Struktur setzt vier Gegenelektroden ein. Wie links angedeutet, kann so die Beschleunigung in zwei orthogonalen, lateralen Raumrichtungen detektiert werden. Rechts dargestellt ist der Betriebsmodus eines Drehratensensors. Treibt man eine Rotation um die x -Achse mit dem Drehimpuls \vec{L}_{antr} an und tritt gleichzeitig eine Drehrate $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ um die z -Achse auf, so führt das Coriolis-Moment M_C nach (3.50) zu einer Rotation um die y -Achse (Wirkung = Ursache \times Mittler).

Das folgende Kapitel stellt eingehend die statische und dynamische Beschreibung dieses Ansatzes einschließlich Stabilitätsbetrachtungen dar und vergleicht ihn mit dem Stand der Technik.



4 Modell und Auslegung des MNI-Inertialsensors

Beginnend mit Stabilitätsbetrachtungen der Struktur nach Abbildung 3.10 beschreibt dieses Kapitel das statische und das dynamische Übertragungsverhalten der Struktur als Beschleunigungssensor sowie das statische Übertragungsverhalten der Struktur als Drehratensensor. Unter den Randbedingungen der verfügbaren Fertigungstechnologien schließt sich daran die Auslegung eines Technologie-Demonstrators zur Beschleunigungsmessung an.

4.1 Stabilität des Stabs

Die angestrebte Funktion des 1D-Federelements als Biegestab für Biegungen um Achsen in der Substratebene und als rotationssteife Aufhängung um die vertikale Achse bedarf einer Betrachtung des elastischen Arbeitsbereichs. Neben dieser angestrebten Funktion des 1D-Federelements treten auch Lasten in vertikaler Richtung auf. Das Federelement muss entsprechend so ausgelegt sein, dass es den Masseblock sicher tragen kann. Ein durch Zugbelastung beanspruchter Stab kann seine Funktion erfüllen, solange die Spannung die Streckgrenze σ_y nicht überschreitet. Liegt eine Druckbelastung vor, zeigt sich ein kritischeres Verhalten.

4.1.1 Vertikale Drucklast: Knickung des Euler-Stabs

Geht man von einem ideal senkrecht stehenden Biegestab aus, der senkrecht mit einer Druckkraft F belastet wird, so weicht der Biegestab ab einer kritischen Kraft F_{krit} von der Ursprungslage ab. Diesen Vorgang des Knickens hat Leonhard Euler (1707–1783) erstmals beschrieben [633], weshalb man von *Eulerschen Knicklasten* spricht. Nach Überschreiten der Knicklast formt ein elastischer Biegestab eine Durchbiegung aus, die Euler *Elastica* nennt. Steht der Biegestab nicht ideal senkrecht oder greift die Kraft F nicht ideal senkrecht an, bildet der Biegestab schon bei geringeren Lasten eine Durchbiegung aus. Die umfangreiche analytische Beschreibung dieser Vorgänge

für statische und dynamische Krafteinleitung in den Biegestab ist in Anhang E dargestellt. An dieser Stelle sei nur auf das Fazit der Betrachtung eingegangen.

Unter idealen Verhältnissen tritt Knicken unter statischer Belastung ab einer kritischen Kraft $F_{\text{krit,stat}}$ auf. Alle Verformungen bei geringeren Kräften sind vernachlässigbar, alle Verformungen bei größeren Kräften sind von erheblicher Größe. Unter hochdynamischer Beschleunigung einer Struktur nach Abbildung 3.10 in positive z -Richtung stellt sich ein ähnliches Verhalten mit der kritischen Kraft $F_{\text{krit,dyn}}$ ein. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Masseblock nicht kippt, sodass sich eine andere Biegeform einstellt, vgl. auch Unterschiede der Zeilen *statisch* und *dynamisch* in Abbildung 4.1. Aus der Herleitung in Anhang E.1) folgt $F_{\text{krit,dyn}} = 16F_{\text{krit,stat}}$.

Zur übersichtlichen Beschreibung der Sicherheitsreserve bevor Knicken eintritt, sei dazu die *Knicksicherheit* definiert:

$$S_k = \frac{F_{\text{krit,stat}}}{F} = \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \frac{EI}{F} \quad (4.1)$$

$$= \frac{1}{16} \frac{F_{\text{krit,dyn}}}{F} = \frac{1}{16} \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 \frac{EI}{F} \quad (4.2)$$

mit

$$I = I_x = I_y = \frac{\pi}{64} d_w^4 = \text{Flächenträgheitsmoment} \quad [I] = \text{m}^4$$

$$l = \text{Länge des Biegestabs} \quad [l] = \text{m}$$

$$E = \text{Elastizitätsmodul} \quad [E] = \text{Pa}$$

$$d_w = \text{Durchmesser des Biegestabs} \quad [d_w] = \text{m}$$

Neben Belastungen des ideal senkrechten Biegestabs treten im Einsatz der Struktur nach Abbildung 3.10 auch Kräfte in negative z -Richtung auf einen durchbogenen Biegestab auf, vgl. Abbildung 4.1 a). Liegen Fertigungstoleranzen vor, kann der Biegestab unter einem Winkel $\neq \frac{\pi}{2}$ zum Substrat fixiert sein, vgl. Abbildung 4.1 b). Weiterhin kann der Schwerpunkt des Masseblocks nicht zentral über der Biegestabmitte liegen, vgl. Abbildung 4.1 c). Unter diesen Bedingungen treten bereits bei senkrechten Druckkräften deutlich kleiner als der statischen Knicklast ($F < F_{\text{krit,stat}}$) erhebliche Neigungen, Durchbiegungen und vertikale Verschiebungen auf. Im hoch dynamischen Fall vertikaler Krafteinwirkung hält der Biegestab größere Kräfte aus als im

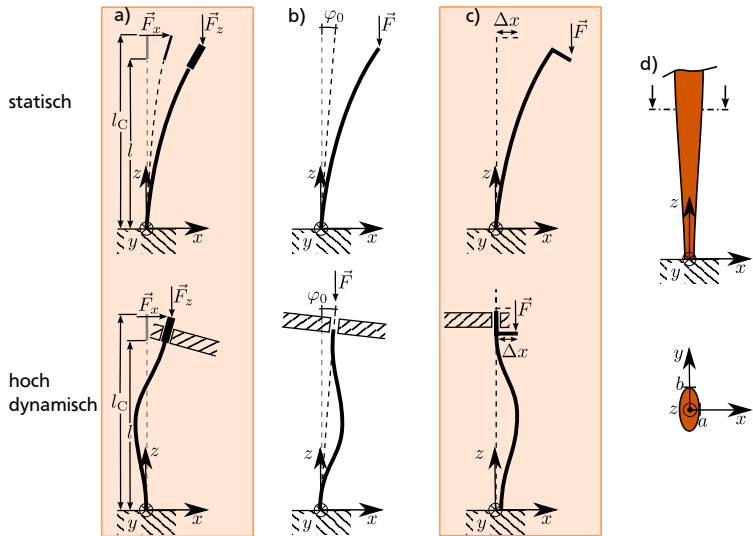


Abbildung 4.1: Beispiele für nicht ideale Verhältnisse bei senkrechter Krafteinwirkung im *statischen* und im *hoch dynamischen* Fall: a) Durchbogener Biegestab, b) Schräg stehender Biegestab, c) Außermittiger Kraftangriff, d) Variierende Flächenträgheitsmomente (gleich für statisch und hoch dynamisch).

statischen, allerdings werden die Kräfte durch die größeren Beschleunigungen im hoch dynamischen Fall deutlich größer sein als im statischen.

Darüber hinaus kann der Querschnitt des Biegestabs in den beiden lateralen Raumrichtungen variieren, vgl. Abbildung 4.1 d). In der gleichen Teil-Abbildung ist auch dargestellt, wie das Flächenträgheitsmoment entlang der z -Achse variieren kann.

Resümierend lässt sich festhalten, dass die Knicksicherheit „großzügig“ auszulegen ist, damit auch bei Kombinationen der genannten Nichtidealitäten und in unvorhergesehenen Fällen die Stabilität des Biegestabs gewährleistet ist.

4.1.2 Vertikale Zuglast

Treten Kräfte in positive z -Richtung auf, so längt sich der Stab. Bis zur Fließgrenze liegt elastisches Verhalten vor, sodass die Dehnung reversibel ist und folgender Zusammenhang gilt:

$$\varepsilon = \frac{\Delta z_l}{l} = \frac{\sigma}{E} < \frac{\sigma_{\text{Fließgr.}}}{E} \quad (4.3)$$

mit

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{Dehnung} & [\varepsilon] &= 1 \\ \sigma &= \text{Spannung} & [\sigma] &= \text{Pa} \end{aligned}$$

Für eine gute Vergleichbarkeit mit der vertikalen Drucklast sei die Definition der Knicksicherheit nach (4.1) herangezogen, sodass folgt

$$\varepsilon = \frac{F}{AE} = \frac{4F}{\pi d_w^2 E} = \frac{\pi I}{d_w^2 l^2} \frac{1}{S_k} \quad (4.4)$$

$$= \frac{\pi^2}{64} \left(\frac{1}{AR} \right)^2 \frac{1}{S_k} \quad (4.5)$$

mit

$$A = \pi \frac{d_w^2}{4} \quad [A] = \text{m}^2$$

$$I = \frac{\pi}{64} d_w^4 \quad [I] = \text{m}^4$$

$$\frac{l}{d_w} = AR = \text{Aspektverhältnis} \quad [AR] = 1$$

In Abbildung 4.2 ist der grundsätzliche Zusammenhang der elastischen Dehnung für Stäbe mit unterschiedlichen Aspektverhältnissen in Abhängigkeit der auf die statische Knicklast $F_{\text{krit,stat}}$ normierten Zuglast dargestellt. Je größer das Aspektverhältnis, desto niedriger liegt die Dehnungs-Kurve, da das Aspektverhältnis die Norm – also die Knicklast – beeinflusst. Nach oben begrenzt ist die Gültigkeit der Kurven durch das Erreichen der plastischen Verformung. Zur Orientierung sind daher die Dehnungen beim Erreichen der Fließgrenze nach (4.3) für verschiedene Materialien eingezeichnet, vgl. Tabelle 3.5 und Abbildung 3.9.

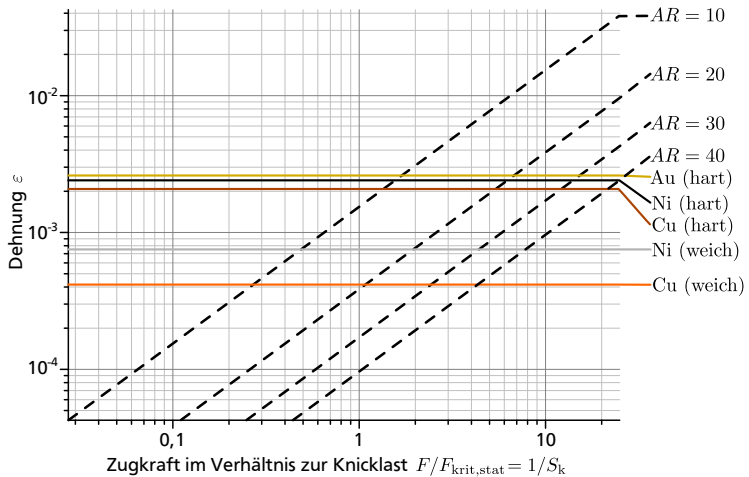


Abbildung 4.2: Elastisches Dehnungs-Verhalten von auf Zug belasteten zylindrischen Stäben mit Aspektverhältnissen AR zwischen 10 und 40 sowie Grenze des elastischen Bereichs für verschiedene Materialien nach Tabelle 3.5 und Abbildung 3.9.

4.1.3 Laterale Biegung und Torsion um vertikale Achse

Unter der Annahme, dass der Biegestab nicht knickt, sind die Grenzen des elastischen Arbeitsbereichs hinsichtlich der Lastfälle Biegung und Torsion sowie deren Kombination zu beleuchten. Es ist zu klären, welche Biegung um eine laterale Achse maximal auftreten darf, sodass die Bedingung elastischen Verhaltens erfüllt bleibt. Der Stab soll den Masseblock auch bei beschleunigter Rotationsbewegung um die z -Achse stabil tragen. Dazu ist sein Torsionsverhalten zu untersuchen.

Ausgehend von der Hypothese der Gestaltänderungsenergie (von Mises) lässt sich aus den Normalspannungen σ und den Schubspannungen τ eine Vergleichsspannung σ_v berechnen. Belastet man den Stab mit dieser Normalspannung σ_v auf Zug, ist der Werkstoff genauso stark beansprucht wie durch das Zusammenwirken der einzelnen Normal- und Schubspannungen nach folgendem Zusammenhang [634]:

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_x^2 - \sigma_z \sigma_x + 3\tau_{zx}^2} < \sigma_{\text{Fließgr.}} \quad (4.6)$$

Biegebelastung

Die maximale Normalspannung unter Biegebelastung entsteht am Fuß des Biegestabs am äußeren Rand des Querschnitts. Leitet man im Schwerpunkt des Masseblocks oberhalb des oberen Stabendes eine horizontale Kraft F_x ein, vgl. Abbildung 4.1 a) statisch, so gilt [634]:

$$\sigma_{x,\max} = \frac{32}{\pi} \frac{l_C}{d_W^3} F_x < \sigma_{\text{Fließgr.}} \quad (4.7)$$

$$\Rightarrow F_x < \frac{\pi}{32} \frac{d_W^3}{l_C} \sigma_{\text{Fließgr.}} \quad (4.8)$$

Torsionsbelastung

Die Schubspannung unter Torsionsbelastung ist entlang der Längsachse homogen und am äußeren Rand des Querschnitts maximal. Leitet man am oberen Ende des Stabs ein Moment um die vertikale Achse M_z ein, so gilt mit (4.6) [634]:

$$\tau_{zx} = \frac{16}{\pi} \frac{1}{d_W^3} M_z < \frac{\sigma_{\text{Fließgr.}}}{\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

$$\Rightarrow M_z < \frac{\pi}{16\sqrt{3}} d_W^3 \sigma_{\text{Fließgr.}} \quad (4.10)$$

Biegung und Torsion

Tritt eine Kombination aus Biege- und Torsionsbelastung auf, so lässt sich mit (4.6), (4.7) und (4.9) eine Aussage über die Stabilität des Stabs treffen.

Geometrie-unabhängige Ausdrücke lassen sich aus (4.6), (4.8) und (4.10) nicht ohne weiteres ableiten, sodass diese Bedingungen bei der Dimensionierung der Strukturen nach Abbildung 3.10 jeweils für konkrete Werte zu überprüfen sind.

4.2 Statisches Übertragungsverhalten des Beschleunigungssensors

Unter Voraussetzung einer ausreichend hohen Knicksicherheit soll der folgende Abschnitt das statische Übertragungsverhalten der horizontalen Beschleunigung a_x in die Auslenkung ξ und anschließend in die Kapazitätsänderung ΔC beschreiben, vgl. Abbildung 4.3. Eine Auswerteelektronik wandelt die Kapazitätsänderung ΔC in ein Signal u^* um. Die folgenden beiden Abschnitte gehen auf die Auslegung der Wandler B_1 und B_2 ein, die zusammen den Primärsensor bilden.

Wie in Abschnitt 3.1.1 dargestellt, liegt ein Messbereich von $\pm 10\text{ g}$ im Mittelfeld typischer Beschleunigungssensoren und eröffnet ein weites Anwendungsfeld. Daher soll für die Analyse des Übertragungsverhaltens zunächst von einem möglichst allgemeinen Fall ausgegangen werden, im speziellen jedoch der Messbereich von $\pm 10\text{ g}$ angenommen werden.

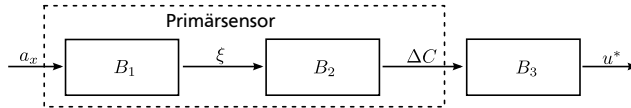


Abbildung 4.3: Wandlerkette des Beschleunigungssensors.

4.2.1 Wandlung der Beschleunigung in Auslenkung

Vorausgesetzt sei ein durch die horizontale Kraft F_x und die ähnlich große vertikale Kraft F_z belasteter Biegestab nach Abbildung 4.4 a). Die Differentialgleichung der Biegelinie für $(w')^2 \ll 1$ lautet nach ([635] Kapitel 4.2) mit dem Moment $M(z) = M$ in negative y -Richtung und der Querkraft $Q(z) = Q$ in positive x -Richtung

$$w''(z) = -\frac{M}{EI} \quad (4.11)$$

Daraus folgt

$$(EIw''(z))' = -Q \quad (4.12)$$

$$EIw''(z) = -M = -Qz + C_0 \quad (4.13)$$

$$EIw'(z) = -\frac{1}{2}Qz^2 + C_0z + C_1 \quad (4.14)$$

$$EIw(z) = -\frac{1}{6}Qz^3 + \frac{1}{2}C_0z^2 + C_1z + C_2 \quad (4.15)$$

Rein horizontale Krafteinwirkung

Für rein horizontale Krafteinwirkung F_x folgt aus diesen vier Gleichungen

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow C_2 = 0 \quad (4.16)$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow C_1 = 0 \quad (4.17)$$

$$Q(l) = F_x \quad (4.18)$$

$$M(l) = -(l_C - l) F_x \quad \rightarrow C_0 = F_x l_C \quad (4.19)$$

Somit ergibt sich durch Einsetzen der Lösungen für die Integrationskonstanten C_0 , C_1 und C_2 in die allgemeine Lösung der Differentialgleichung sowie ihrer Ableitungen für $0 \leq z \leq l$

$$w(z) = \frac{F_x z^2}{2EI} \left(l_C - \frac{z}{3} \right) \quad \rightarrow w_l = \frac{F_x l^2}{2EI} \left(l_C - \frac{l}{3} \right) \quad (4.20)$$

$$w'(z) = \frac{F_x z}{EI} \left(l_C - \frac{z}{2} \right) \quad \rightarrow w'_l = \varphi_l = \frac{F_x l}{EI} \left(l_C - \frac{l}{2} \right) \quad (4.21)$$

Damit lässt sich analog zu (E.70) formulieren

$$\Delta z_l \approx \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz = \frac{F_x^2 l^3}{2E^2 I^2} \left(\frac{l_C^2}{3} - \frac{l_C l}{4} + \frac{l^2}{20} \right) \quad (4.22)$$

Folglich ist die Bewegung des Stabendes von \vec{P}_0 nach \vec{P}'_0 in Abbildung 4.4 b) zu beschreiben mit

$$\Delta \vec{P}_0 = \begin{bmatrix} w_l \\ 0 \\ -\Delta z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_x l^2}{2EI} \left(l_C - \frac{l}{3} \right) \\ 0 \\ -\frac{F_x^2 l^3}{2E^2 I^2} \left(\frac{l_C^2}{3} - \frac{l_C l}{4} + \frac{l^2}{20} \right) \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

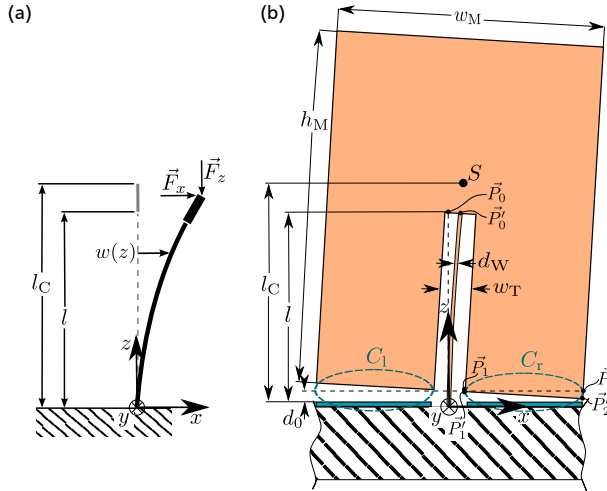


Abbildung 4.4: a) Biegestab unter horizontaler und vertikaler Krafteinwirkung, b) Eigener Ansatz für Beschleunigungssensorstrukturen mit senkrechtem Biegestab.

Die Verschiebung der rechten, unteren Außenkante am Masseblock nach Abbildung 4.4 b) von \vec{P}_2 nach \vec{P}'_2 lässt sich darstellen durch

$$\Delta \vec{P}_2 = \vec{P}'_2 - \vec{P}_2 = \begin{bmatrix} \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$= \mathbf{K} (\vec{P}_2 - \vec{P}_0) + \vec{P}_0 + \Delta \vec{P}_0 - \vec{P}_2 \quad (4.25)$$

mit

$$\vec{P}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{bmatrix}, \quad \vec{P}_2 = \begin{bmatrix} \frac{w_M}{2} \\ 0 \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \cos w'_l & 0 & \sin w'_l \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin w'_l & 0 & \cos w'_l \end{bmatrix} = \text{Rotationsmatrix} \quad (4.27)$$

Analog verschiebt sich die linke, untere Außenkante am Masseblock. Um die statische Wandlung der horizontalen Beschleunigung a_x in die Auslenkung ξ vollständig beschreiben zu können, ist folgender Zusammenhang

zwischen Kraft F_x und Beschleunigung a_x notwendig, der eine quadratische Grundfläche des Masseblocks mit den Seitenlängen w_M voraussetzt

$$F_x = ma_x \quad (4.28)$$

$$\text{mit } m = \rho \left(w_M^2 h_M - w_M w_T (l - d_0) \right)$$

Weiterhin sei zur Berechnung des Masseschwerpunkts l_C in z -Richtung der folgende Zusammenhang angenommen

$$l_C = \frac{1}{V} \int z \, dV \quad \text{mit dem Körpervolumen } V \quad (4.29)$$

$$= \frac{h_M}{2} \frac{h_M w_M - l^2 \frac{w_T}{h_M} + 2d_0 w_M + d_0^2 \frac{w_T}{h_M}}{h_M w_M - l w_T + d_0 w_T} \quad (4.30)$$

Einfluss vertikaler Krafteinwirkung

Tritt zusätzlich zur horizontalen Kraft F_x die vertikale Kraft $F_z = ma_z$ nach Abbildung 4.4 a) auf, ist die Beschreibung des Biegeverhaltens deutlich aufwendiger. Basierend auf den im Anhang E.3.1 dargestellten Herleitungen soll hier geprüft werden, ob F_z berücksichtigt werden muss, wenn F_z ähnlich groß ist wie F_x . Es ist also zu prüfen, ob sich $\Delta \vec{P}_2$ im Fall einer Struktur nach Abbildung 4.4 b) durch $a_z \neq 0$ wesentlich ändert.

Aus technologischen Voruntersuchen heraus [21] sind realisierbare Strukturgrößen bekannt, weshalb hier erstmals Annahmen für die gesamte Struktur getroffen werden sollen, vgl. Tabelle 4.1. Bei diesen Annahmen der Dimensionierung ist lediglich die Breite des Masseblocks w_M auf einen konkreten Wert festgelegt, die übrigen Parameter skalieren mit diesem Wert. So wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf Basis der technologischen Randbedingungen gesteigert und die Dimensionierung vereinfacht. Somit lassen sich Neigung φ_l , Durchbiegung w_l und vertikale Verschiebung Δz_l für $a_x = 0..10 \, g$ bei $a_z = 1 \, g$ nach den Ergebnissen des Anhangs E.3.1 bestimmen, vgl. Abbildung 4.5.

Im Detail sind also die Beschreibungen der Neigung φ_l in (4.21) und (E.90), der Durchbiegung w_l in (4.20) und (E.92) sowie der vertikalen Verschiebung Δz_l in (4.22) und (E.95) für $a_x = 0..10 \, g$ und $a_z = 0..10 \, g$ miteinander

Tabelle 4.1: Vereinfachende Annahmen für eine Struktur nach Abbildung 4.4 b) .

Größe	l_C	d_W	d_0	h_M	w_T	w_M	E	ρ
Annahme	$\frac{11}{10} l$	$\frac{1}{10} l$	$\frac{1}{50} l$	$2l$	$\frac{1600}{2891} l$	$2l = 1 \text{ mm}$	130 GPa	$9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

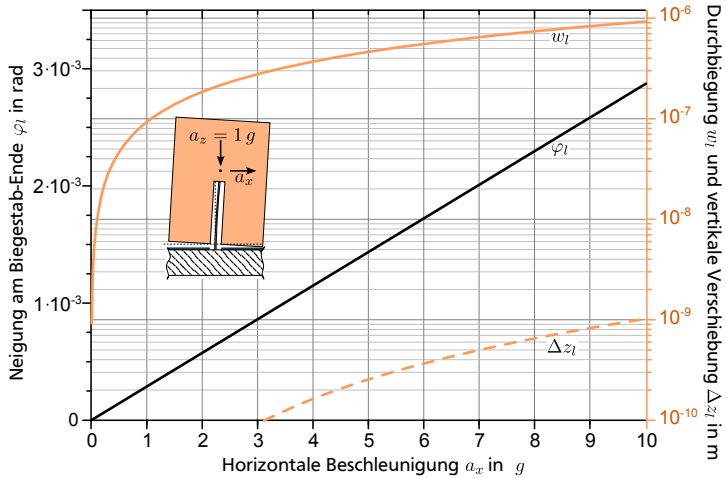


Abbildung 4.5: Neigung φ_l (linke Achse), Durchbiegung w_l (rechte Achse) und vertikale Verschiebung Δz_l (rechte Achse) am oberen Biegestab-Ende in Abhängigkeit der horizontalen Beschleunigung a_x unter Einwirken einer vertikalen Beschleunigung $a_z = 1 \text{ g}$ für eine Struktur nach Abbildung 4.4 b) und Annahmen nach Tabelle 4.1, vgl. (E.91), (E.93) und (E.96).

zu vergleichen. Das Einsetzen der Werte nach Tabelle 4.1 zeigt, dass die vertikale Beschleunigung vernachlässigt werden kann:

$$\frac{\varphi_{l,(E.90)} - \varphi_{l,(4.21)}}{\varphi_{l,(E.90)}} = 0,19 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{a_z}{g} \quad (4.31)$$

$$\frac{w_{l,(E.92)} - w_{l,(4.20)}}{w_{l,(E.92)}} = 0,19 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{a_z}{g} \quad (4.32)$$

$$\frac{\Delta z_{l,(E.95)} - \Delta z_{l,(4.22)}}{\Delta z_{l,(E.95)}} = 0,39 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{a_z}{g} \quad (4.33)$$

mit

$$a_x = 0..10 \text{ g}$$

$$a_z = 0..10 \text{ g}$$

Somit beschreibt $\Delta\vec{P}_2$ nach (4.24) bis (4.29) die Wandlung der horizontalen Beschleunigung a_x in die Auslenkung ξ ausreichend genau. Ähnlich große vertikale Beschleunigungen a_z beeinflussen diesen Zusammenhang quasi nicht.

Übertragungsfaktor

Um den Ausdruck für $\Delta\vec{P}_2$ zu vereinfachen, hilft die Berücksichtigung der Zusammenhänge für die Kapazitätsberechnung. Die Grundkapazität C_0 bei $\Delta\vec{P}_2 = 0$ berechnet sich wie folgt

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (4.34)$$

mit

$$\varepsilon_0 = 8,854199 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} = \text{elektrische Feldkonstante}$$

$$\varepsilon_r = 1 = \text{Permittivitätszahl für Luft}$$

$$A = w_M(w_M - w_T) = \text{Elektrodenfläche (laterale Ausdehnung)}$$

$$d = d_0 = \text{Elektrodenabstand (vertikale Spaltdicke)}$$

Die Kippung und die Translation des Masseblocks führen in x -Richtung zu einer veränderten projizierten Grundfläche und damit zu einer Änderung der Elektrodenfläche A . Das Ausmaß dieses Effekts lässt sich durch Δx_2 beschreiben. Die Bewegung des Masseblocks führt außerdem zu einer Veränderung der Spaltdicke d_0 . Dieser Effekt lässt sich grundsätzlich durch Δz_2 charakterisieren. Bringt man Δz_2 und Δx_2 entsprechend Abbildung 4.4 b) und Tabelle 4.1 für $a_x = 0..10 \text{ g}$ ins Verhältnis zur Masseblockbreite w_M bzw. zur Spaltdicke d_0 , folgt dass Δz_2 einen wesentlich größeren relativen Einfluss hat und die Flächenänderung vernachlässigt werden kann, vgl. Abbildung 4.6:

$$\frac{\Delta z_2}{\Delta x_2} \approx 2,92 \quad \frac{\Delta z_2/d_0}{\Delta x_2/w_M} \approx 292 \quad (4.35)$$

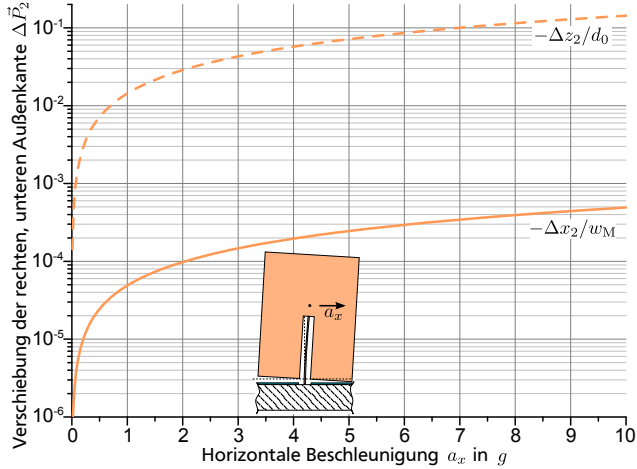


Abbildung 4.6: Verschiebung der rechten, unteren Außenkante am Masseblock in x -Richtung relativ zur Masseblockbreite und in z -Richtung relativ zur Spaltbreite für eine Struktur nach Abbildung 4.4 b) und Annahmen nach Tabelle 4.1.

Der Ausdruck für die Auslenkung Δz_2 nach (4.24) bis (4.27) lautet mit F_x nach (4.28) und l_C nach (4.30)

$$\Delta z_2 = -\frac{w_M}{2} \sin w'_l + (d_0 - l) \cos w'_l + l - d_0 - \underbrace{\frac{F_x^2 l^3}{2E^2 I^2} \left(\frac{l_C^2}{3} - \frac{l_C l}{4} + \frac{l^2}{20} \right)}_{\approx \Delta z_l} \quad (4.36)$$

Für kleine Winkel folgt mit $\sin \varphi \approx \varphi$ und $\cos \varphi \approx 1$ sowie durch Einsetzen von (4.21)

$$\Delta z_2 \approx -\frac{F_x l}{2EI} \left(\underbrace{w_M \left(l_C - \frac{l}{2} \right)}_{s_1} + \underbrace{\frac{F_x l^2}{EI} \left(\frac{l_C^2}{3} - \frac{l_C l}{4} + \frac{l^2}{20} \right)}_{s_2} \right) \quad (4.37)$$

Der Vergleich der Summanden S_1 und S_2 für eine Struktur nach Abbildung 4.4 b) und Tabelle 4.1 zeigt, dass S_1 für $a_x = 0..10\text{ g}$ wesentlich mehr als drei Größenordnungen größer ist als S_2 . Also folgt mit $I = \frac{\pi}{64} d_W^4$

$$\Delta z_2 \approx -m \frac{w_M l (2l_C - l)}{4EI} a_x \quad (4.38)$$

Somit ergibt sich der Übertragungsfaktor B_1 entsprechend Abbildung 4.3 mit l_C nach (4.30) zu

$$B_1 = \frac{\xi}{a_x} = -\frac{\Delta z_2}{a_x} \approx m \frac{w_M l (2l_C - l)}{4EI} \quad (4.39)$$

$$= \frac{\rho}{E} \frac{16l(l - 2l_C)w_M^2(lw_T - h_M w_M - d_0 w_T)}{\pi d_W^4} \quad (4.40)$$

Für die Annahmen nach Tabelle 4.1 beträgt er

$$B_1 = 1,491 \frac{\mu\text{m}}{\text{g}} \quad (4.41)$$

4.2.2 Wandlung der Auslenkung in Kapazitätsänderung

Die Anordnung in Abbildung 4.4 b) eignet sich zur differentiell kapazitiven Auswertung, denn im skizzierten Fall nimmt die rechte Teilkapazität durch den sinkenden Spaltabstand zu und die linke durch den steigenden Spaltabstand ab. Somit ergibt sich für die Kapazitätsänderung unter der Bedingung dass der Masseblock die Gegenelektrode auf Substratniveau nicht berührt ($|\Delta z_2| < d_0$)

$$\Delta C = C_r - C_l \quad (4.42)$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon_r w_M \left(\int_{\frac{w_T}{2}}^{\frac{w_M}{2}} \frac{1}{d_0 + \frac{2\Delta z_2}{w_M} x} dx - \int_{-\frac{w_M}{2}}^{-\frac{w_T}{2}} \frac{1}{d_0 + \frac{2\Delta z_2}{w_M} x} dx \right) \quad (4.43)$$

$$= \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r w_M^2}{2\Delta z_2} \left(\left[\ln(d_0 w_M + 2\Delta z_2 x) \right]_{\frac{w_T}{2}}^{\frac{w_M}{2}} + \left[\ln(d_0 w_M + 2\Delta z_2 x) \right]_{-\frac{w_T}{2}}^{-\frac{w_M}{2}} \right) \quad (4.44)$$

$$= \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{w_M^2}{2\Delta z_2} \ln \left(\frac{d_0^2 w_M^2 - \Delta z_2^2 w_M^2}{d_0^2 w_M^2 - \Delta z_2^2 w_T^2} \right) \quad (4.45)$$

Geht man von Vakuum oder Luft im Spalt aus ($\varepsilon_r = 0$), ergibt sich der Übertragungsfaktor B_2 entsprechend Abbildung 4.3 zu

$$B_2 = \frac{\Delta C}{\xi} = \frac{\Delta C}{B_1 a_x} \quad (4.46)$$

$$= \varepsilon_0 \frac{w_M^2}{2(B_1 a_x)^2} \ln \left(\frac{d_0^2 w_M^2 - (B_1 a_x)^2 w_T^2}{d_0^2 w_M^2 - (B_1 a_x)^2 w_M^2} \right) \quad (4.47)$$

Bezieht man die Kapazitätsänderung auf die Grundkapazität C_0 nach (4.34), folgt

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{d_0}{2\Delta z_2} \frac{w_M}{w_M - w_T} \ln \left(\frac{d_0^2 w_M^2 - \Delta z_2^2 w_M^2}{d_0^2 w_M^2 - \Delta z_2^2 w_T^2} \right) \quad (4.48)$$

Für eine Struktur nach Abbildung 4.4 b) und Tabelle 4.1 ergibt sich der in Abbildung 4.7 dargestellte Verlauf der relativen Kapazitätsänderung nach (4.48).

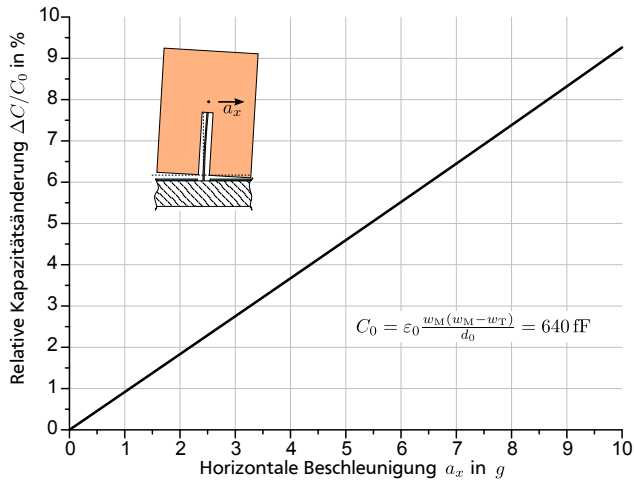


Abbildung 4.7: Berechnete relative Kapazitätsänderung nach (4.48) sowie Tabelle 4.1 mit $\Delta C = C_r - C_l$.

4.3 Dynamisches Übertragungsverhalten des Beschleunigungssensors

Analog zum statischen Fall, sei auch im dynamischen Fall die Wandlung der horizontalen Beschleunigung \underline{a} in die Auslenkung $\underline{\xi}$, anschließend in die Kapazitätsänderung $\underline{\Delta C}$ und letztlich in das Signal \underline{u}^* anhand der Wandlerkette in Abbildung 4.8 beschrieben.

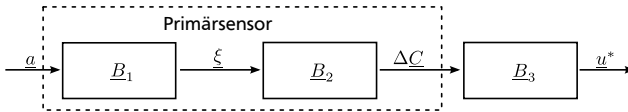


Abbildung 4.8: Wandlerkette des Beschleunigungssensors in komplexer Schreibweise.

4.3.1 Wandlung von der Beschleunigung in die Auslenkung

Die statische Bewegung des Masseblocks besteht aus der Überlagerung einer Translation, die auf den Masseschwerpunkt konzentriert beschrieben werden kann (vgl. $\Delta \vec{P}_0$ in (4.23)), und einer Rotation des Masseblocks (vgl. Rotationsmatrix \mathbf{K} in (4.27)). Für die dynamische Betrachtung sind sie getrennt zu untersuchen. Ähnlich wie in Abbildung 3.1 stellt Abbildung 4.9 das Modell für Translation und Kräftegleichgewicht sowie Rotation und Momentengleichgewicht dar. Die vektorielle Darstellung mit dem Koordinatensystem aus Abbildung 4.4 b) geht von einer Auslenkung der Probemasse in positive x -Richtung und einer Geschwindigkeit in positive x -Richtung aus bzw. von einer Neigung der Probemasse um eine Achse in y -Richtung und einer Winkelgeschwindigkeit in positive y -Richtung aus. Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, ist für die hier betrachtete Struktur die Translation des Masseschwerpunkts in z -Richtung vernachlässigbar klein.

Das Kräftegleichgewicht ergibt sich entsprechend der vektoriellen Darstellung zu

$$\vec{F}_a = m \mathbf{s}_B^2 \vec{b} + r_x \mathbf{s}_B \vec{b} + \frac{\vec{b}}{n_x} \quad (4.49)$$

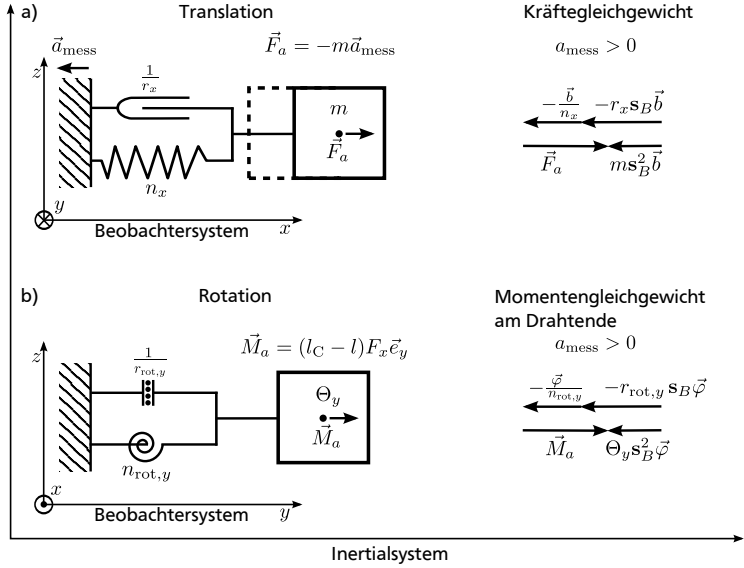


Abbildung 4.9: Verhalten der Probemasse: a) Translatorische Bewegung der Probemasse, b) Rotatorische Bewegung der Probemasse. Darstellung der Vektoren unter der Annahme, dass a) die Probemasse in positive x -Richtung ausgelenkt ist und sich in positive x -Richtung bewegt bzw. b) die Probemasse positiv orientiert um die y -Achse gedreht ist und positiv orientiert um die y -Achse rotiert.

Im Schwerpunkt des Masseblocks greifen \vec{F}_a und $ms_B^2 \vec{b}$ an. Am Drahtende im Abstand $l_C - l$ zum Schwerpunkt greifen die Feder- und die Dämpferkraft an. Diese beiden Kräftegruppen machen das Kräftepaar \vec{F}_x und $-\vec{F}_x$ für das Momentengleichgewicht aus mit

$$\vec{F}_x = \vec{F}_a - ms_B^2 \vec{b} = \frac{\vec{b}}{n_x} + r_x \mathbf{s}_B \vec{b} \quad (4.50)$$

Das Momentengleichgewicht ergibt sich entsprechend der vektoriellen Darstellung zu

$$((l_C - l) \vec{e}_z) \times \vec{F}_x = \Theta_y s_B^2 \vec{\varphi} + r_y \mathbf{s}_B \vec{\varphi} + \frac{\vec{\varphi}}{n_y} \quad (4.51)$$

In komplexer Darstellung folgt nach (3.17) für die Translation des Masse-
schwerpunkts nach (4.49) unter Beachtung der Zählweise $\underline{F}_a = m\underline{a}_x$

$$m\underline{a}_x = ms_x^2 \underline{x} + r_x s_x \underline{x} + \frac{\underline{x}}{n_x} \quad (4.52)$$

$$\Rightarrow \frac{\underline{x}}{\underline{a}_x} = \frac{1}{s_x^2 + s_x \frac{\omega_{0x}}{Q_x} + \omega_{0x}^2} \quad (4.53)$$

mit

$$\omega_{0x}^2 = \frac{1}{mn_x} = \text{Resonanzfrequenz Translation} \quad (4.54)$$

$$Q_x = \frac{1}{\omega_{0x} n_x r_x} = \text{Resonanzgüte Translation} \quad (4.55)$$

Liegen die Resonanzfrequenzen des translatorischen und des rotatorischen
Schwingungsmodus weit auseinander, folgt mit (4.50) bis (4.55) für die Ro-
tation in komplexer Darstellung

$$\frac{\varphi}{y} = \frac{(l_C - l) \overbrace{(m\underline{a}_x - ms_x^2 \underline{x})}^{F_x}}{s_y^2 + s_y \frac{\omega_{\text{rot},0y}}{Q_{\text{rot},y}} + \omega_{\text{rot},0y}^2} \quad (4.56)$$

$$\Rightarrow \frac{\varphi}{\underline{a}_x} = \frac{m(l_C - l)}{\Theta_y} \frac{s_x \frac{\omega_{0x}}{Q_x} + \omega_{0x}^2}{\left(s_x^2 + s_x \frac{\omega_{0x}}{Q_x} + \omega_{0x}^2\right) \left(s_y^2 + s_y \frac{\omega_{\text{rot},0y}}{Q_{\text{rot},y}} + \omega_{\text{rot},0y}^2\right)} \quad (4.57)$$

mit

$$\omega_{\text{rot},0y}^2 = \frac{1}{\Theta_y n_{\text{rot},y}} = \text{Resonanzfrequenz Rotation} \quad (4.58)$$

$$Q_{\text{rot},y} = \frac{1}{\omega_{0y} n_{\text{rot},y} r_{\text{rot},y}} = \text{Resonanzgüte Rotation} \quad (4.59)$$

Die Trägheitsparameter der Struktur nach Abbildung 4.4 betragen mit $\Theta_y = \Theta_y(z = l)$

$$m = \rho \int dV = \rho(w_M^2 h_M - w_M w_T(l - d_0)) \quad (4.60)$$

$$\Theta_y = \rho \int r^2 dV \quad (4.61)$$

$$= \frac{1}{12} \rho w_M \left(4(h_M - l + d_0)^3 w_M + (h_M - l + d_0) w_M^3 + \right. \quad (4.62)$$

$$\left. 4(l - d_0)^3 w_M - 4(l - d_0)^3 w_T + (l - d_0) w_M^3 - (l - d_0) w_T^3 \right)$$

Setzt man für den Biegestab das gleiche Verhalten wie im statischen Fall voraus, ergeben sich die Ausdrücke für die Nachgiebigkeit aus (4.20) und (4.21) mit der Annahme $I_x = I_y = \frac{\pi}{64} d_W^4$ zu

$$n_x = \frac{w_l}{F_x} = \frac{1}{2EI} l^2 \left(l_C - \frac{l}{3} \right) = \frac{32}{\pi} \frac{l^2}{Ed_W^4} \left(l_C - \frac{l}{3} \right) \quad (4.63)$$

$$n_{\text{rot},y} = \frac{\varphi_l}{F_x (l_C - l)} = \frac{1}{EI} \frac{l}{l_C - l} \left(l_C - \frac{l}{2} \right) = \frac{64}{\pi} \frac{l}{Ed_W^4 (l_C - l)} \left(l_C - \frac{l}{2} \right) \quad (4.64)$$

Damit lassen sich die Resonanzfrequenzen der Translation und der Rotation für die gesamte Struktur nach (4.54) und (4.58) bestimmen.

Neben der bisher betrachteten Biegung des Stabs durch Bewegungen des Masseblocks kann der isolierte Biegestab auch durch seine eigene Masse schwingen. Diese Schwingungen lassen sich mit dem oben verwendeten Formalismus beschreiben unter der Annahme, dass die Masse homogen entlang der Hauptachse (z-Achse) verteilt ist. Die entsprechenden Parameter ergeben sich wie folgt, vgl. Anhang E.4:

$$m_{\text{Stab}} = \rho l \pi \left(\frac{d_W}{2} \right)^2 \quad \Theta_{y,\text{Stab}} = \frac{\rho \pi d_W^2 l^3}{12} \quad (4.65)$$

$$n_{x,\text{Stab}} = \frac{l^3}{8EI} \quad n_{\text{rot},y,\text{Stab}} = \frac{l}{3EI} \quad (4.66)$$

$$\omega_{0x,\text{Stab}} = \frac{1}{\sqrt{m_{\text{Stab}} n_{x,\text{Stab}}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{d_W}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.67)$$

$$\omega_{\text{rot},0y,\text{Stab}} = \frac{1}{\sqrt{\Theta_{y,\text{Stab}} n_{\text{rot},y,\text{Stab}}}} = \frac{3}{4} \frac{d_W}{l^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (4.68)$$

Die Resonanzfrequenzen des einseitig eingespannten Biegestabs im Grundmodus liegen deutlich oberhalb derjenigen der gesamten Struktur. Daher sind Eigenschwingungen des Biegestabs bei der Betrachtung der gesamten Struktur nicht von Bedeutung.

Die bisher getroffenen Annahmen und Abschätzungen führen für Abmessungen der gesamten Struktur nach Tabelle 4.1 zu den in Tabelle 4.2 aufgeführten dynamischen Kennwerten. Bei Betrachtung der gesamten Struktur ist die Masse des Biegestabs nicht berücksichtigt. Bei Betrachtung des Biegestabs allein ist dessen Trägheit berücksichtigt.

Tabelle 4.2: Dynamischen Kennwerte des Biegestabs und der gesamten Struktur nach Abbildung 4.4 und Tabelle 4.1.

Translation	$\frac{\omega_{0x}}{2\pi}$ in kHz	m in mg	n_x in $10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{N}}$
Stab allein	85,543	0,009	0,392
Gesamte Struktur	1,646	7,780	1,201
Rotation	$\frac{\omega_{\text{rot},0y}}{2\pi}$ in kHz	Θ_y in 10^{-12} kg m^2	$n_{\text{rot},y}$ in $10^3 \frac{1}{\text{N m}}$
Stab allein	90,732	0,001	4,179
Gesamte Struktur	0,491	1,395	75,219

Dämpfung

Die *Resonanzgüte* Q wird von vielen unterschiedlichen Effekten beeinflusst. Sie sind je nach Druckbereich, in dem der Aufbau betrieben wird, unterschiedlich dominant:

Intrinsische Dämpfung Sie tritt im Material des Biegestabs auf und dominiert bei Betrieb in Vakuum.

Molekulare Dämpfung Sie tritt durch Stoßreaktionen mit Gasmolekülen bei geringem Druck auf (1-1000 Pa = 0,01-10 mbar) und ist in MEMS zumeist größer als die intrinsische Dämpfung.

Viskose Dämpfung Sie tritt durch Strömungswiderstände bei Annäherung an Atmosphärendruck auf und ist in MEMS zumeist größer als die beiden zuvor genannten Dämpfungs-Typen.

Wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, können Submikrodrähte aus Gold im Hochvakuum Resonanzgüten von 600 bis 900 erreichen [627, 628]. Geht man von einem ähnlichen Wert $Q_{\text{intr,Stab}}$ – beispielsweise 500 – für den isolierten, homogenen, runden Biegestab aus, folgt für die Resonanzgüte der gesamten Struktur für die Translation und rein *intrinsische Dämpfung*

$$Q_{x,\text{intr}} = \frac{1}{\omega_{0x} n_x r_{\text{intr,Stab}}} = \frac{Q_{\text{intr,Stab}}}{\omega_{0x} n_x \sqrt{\frac{m_{\text{Stab}}}{n_{x,\text{Stab}}}}} = \frac{Q_{\text{intr,Stab}}}{\omega_{0x} n_x} \frac{4l}{\pi d_W^3} \sqrt{\frac{2}{\rho E}} \quad (4.69)$$

Analog ergibt sich die Resonanzgüte der gesamten Struktur für die Rotation zu

$$Q_{\text{rot,y},\text{intr}} = \frac{1}{\omega_{\text{rot,0y}} n_{\text{rot,y}} r_{\text{rot,y,Stab}}} = \frac{Q_{\text{intr,Stab}}}{\omega_{\text{rot,0y}} n_{\text{rot,y}} \sqrt{\frac{\Theta_{y,\text{Stab}}}{n_{\text{rot,y,Stab}}}}} \quad (4.70)$$

$$= \frac{Q_{\text{intr,Stab}}}{\omega_{\text{rot,0y}} n_{\text{rot,y}}} \frac{16}{\pi d_W^3 l} \sqrt{\frac{1}{\rho E}} \quad (4.71)$$

Ausgehend von einer weit verbreiteten Methode zur Berechnung der *molekularen Dämpfung* [636, 637] findet hier ein aktualisierter Ansatz nach [638] Anwendung, dessen Gültigkeit für ein ähnliches System wie das hier

betrachtete untersucht worden ist. So ergibt sich für die Translation der gesamten Struktur ein vom Druck p abhängiger Zusammenhang

$$Q_{x,\text{mol}} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{\omega_{0x} m}{A} \frac{1}{p} \quad (4.72)$$

mit

$$R_0 = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} = \text{universelle Gaskonstante}$$

T = Temperatur

$$M = 0,0290 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = \text{Molmasse der Luft}$$

$$A = h_M w_M = \text{Stirnfläche}$$

Analog folgt für die Rotation

$$Q_{\text{rot},y,\text{mol}} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{\omega_{\text{rot},0y} \Theta_y}{I} \frac{1}{p} \quad (4.73)$$

mit

$$I = \frac{h_M^3 w_M}{12} = \text{Flächenträgheitsmoment}$$

Die *viskose Dämpfung* ist für Translation und Rotation unterschiedlich zu beschreiben, wird jedoch in beiden Fällen von den Verlusten im dünnen Luftspalt zwischen Masseblock und Substrat dominiert.

Bei der *Translation* bewegt sich der Masseblock im Wesentlichen lateral, sodass gleitendes Verhalten zu beschreiben ist (slide-film). Zur Entscheidung, welches Modell anzunehmen ist, dient der charakteristische Abstand [637]

$$\delta = \sqrt{\frac{2\mu}{\rho_{\text{Luft}} \omega_{0x}}} \quad (4.74)$$

mit

$$\mu = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s} = \text{Dynamische Viskosität der Luft bei } 20^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{Luft}} = 1,29 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \text{Dichte der Luft}$$

Ist der Luftspalt zwischen Masseblock und Substrat wie in Tabelle 4.1 aufgeföhrt 10 μm groß, so gilt $d_0 < \delta = 51,9 \mu\text{m}$ und das Couette-Fluss-Modell [637] findet Anwendung mit dem Ergebnis

$$Q_{x,\text{Couette}} = \frac{m\omega_{0x}d_0}{\mu A} = \frac{m\omega_{0x}d_0}{\mu w_M(w_M - w_T)} \quad (4.75)$$

Darüber hinaus haben auch das Gleiten an der oberen Deckfläche des Masseblocks und an den beiden Seitenflächen einen Einfluss, der vereinfachend gleich groß gesetzt sei. Hier ist der Abstand zur gegenüberliegenden Fläche wesentlich größer als δ , sodass das Stokes-Fluss-Modell [637] Anwendung findet mit dem Ergebnis für jede Fläche

$$Q_{x,\text{Stokes}} = \frac{m\omega_{0x}\delta}{\mu A} = \frac{m\omega_{0x}\delta}{\mu h_M w_M} \quad (4.76)$$

Weiterhin ist der Luftwiderstand der Stirnflächen (drag-force) zu beachten. Nimmt man als Fläche einen Kreis [637] gleichen Flächeninhalts wie des betrachteten Quadrats an, folgt als Näherungslösung für jede Fläche

$$Q_{x,\text{Luftwiderstand}} \approx \sqrt{\pi} \frac{\omega_{0x}m}{16\mu w_M} \quad (4.77)$$

Damit folgt für die gesamte viskose Dämpfung der Translation

$$Q_{x,\text{visk}} = \frac{1}{\frac{1}{Q_{x,\text{Couette}}} + \frac{3}{Q_{x,\text{Stokes}}} + \frac{2}{Q_{x,\text{Luftwiderstand}}}} \quad (4.78)$$

Für die viskose Dämpfung der *Rotation* ist die Dickenänderung des Luftspalts bedeutend (squeeze-film). Dort treten laminare Strömungen auf, wenn die für diesen Fall angepasste Reynolds-Zahl R_s deutlich kleiner als 1 ist [637]:

$$R_s = \frac{\omega_{\text{rot},0y}d_0^2\rho_{\text{Luft}}}{\mu} \quad (4.79)$$

Phänomenologisch lässt sich der Grenzwert der angepassten Reynolds-Zahl $R_s = 1$ für die Dickenänderung des Luftspalts mit dem Grenzwert der

Reynolds-Zahl $R_e = 2200$ für eine Rohrströmung vergleichen. Ist der Luftspalt wie in Tabelle 4.1 aufgeführt $10\text{ }\mu\text{m}$ groß, beträgt die angepasste Reynolds-Zahl $R_s = 0,0097$, sodass man von laminaren Verhältnissen für die Dickenänderung des Luftspalts ausgehen kann.

Als Näherungslösung sei eine vertikale Translation der beiden Teilflächen in Abbildung 4.4 b) links und rechts des Biegestabs angenommen, z. B. links nach oben und rechts nach unten. Zusammengenommen ergibt sich die Reibungsimpedanz in Anlehnung an [637]

$$r_{\text{trans},y,\text{visk}} \approx 2\mu w_M \left(\frac{w_M - w_T}{2d_0} \right)^3 \left(1 - 0,58 \frac{w_M - w_T}{2w_M} \right) \quad (4.80)$$

Diese Reibungsimpedanz ist wesentlich größer als die des Couette-Flusses oder die des Stokes-Flusses, weshalb sie für die viskose Dämpfung der Rotation als alleinig bestimmend angesehen werden soll. Für diese Bewegung ist aus der rotatorischen Nachgiebigkeit $n_{\text{rot},y}$ eine entsprechende translatorische Nachgiebigkeit um den Arbeitspunkt Neigung $\varphi = 0$ abzuleiten. Sie ergibt sich zu

$$n_{\text{trans},y,\text{visk}} = \frac{\xi}{F} = \frac{\varphi \frac{w_M + w_T}{4}}{M \frac{2}{w_M + w_T}} = n_{\text{rot},y} \frac{(w_M + w_T)^2}{8} \quad (4.81)$$

Damit folgt als Näherungslösung für die Resonanzgüte der Rotation bei viskoser Dämpfung

$$Q_{\text{rot},y,\text{visk}} \approx \frac{1}{\omega_{\text{rot},0y} n_{\text{trans},y,\text{visk}} r_{\text{trans},y,\text{visk}}} \quad (4.82)$$

Abbildung 4.10 stellt den Verlauf der Resonanzgüte für Translation und Rotation in Abhängigkeit des Drucks unter der Annahme $Q_{\text{intr,Stab}} = 500$ doppelt logarithmisch skaliert dar. Bei niedrigem Druck ist die Güte durch die intrinsische Dämpfung begrenzt, bei hohem Druck durch die viskose Dämpfung und den Übergang beschreibt die molekulare Dämpfung. In den Übergangsbereichen treten Mischeffekte auf, wie Kádár sie an einer ähnlichen Struktur beobachtet hat [638–640]. In Realität werden die Knicke also wesentlich weniger deutlich ausfallen.

Im Modell nicht berücksichtigt sind unter anderem die folgenden Effekte:

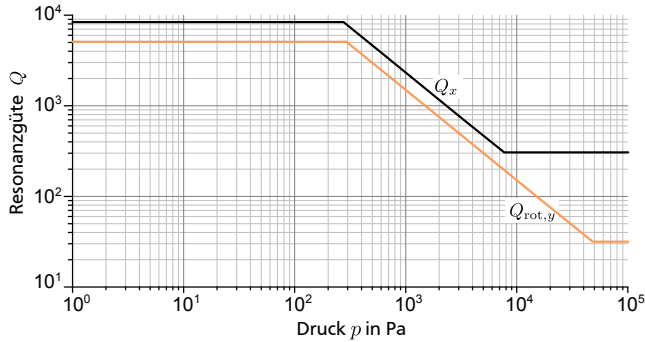


Abbildung 4.10: Berechnete Resonanzgüte der Translation Q_x und der Rotation $Q_{rot,y}$ in Abhängigkeit des Drucks nach (4.70) bis (4.82) sowie Tabellen 4.1 und 4.2 unter der Annahme $Q_{intr,Stab} = 500$.

- Die vom Modell abweichende höhere molekulare Dämpfung [638]
- Die Verschiebung des Kraftangriffspunkts vom translatorischen Dämpfer durch flächig auftretende Dämpfung und dadurch die Änderung des Moments (F_x in (4.50) und (4.56))
- Die Versteifung der Feder im translatorischen Modus durch ein anderes Biegeverhalten als im rotatorischen Grundmodus (freies Ende)
- Das Federverhalten des Gasfilms
- Der Einfluss der vertikalen Translation vor allem auf $r_{x,visk}$
- Die Beeinflussung der beiden Resonanzfälle, wenn sich die Resonanzfrequenzen annähern

Übertragungsfunktion

Wie mit Hilfe von (4.35) und (4.37) beschrieben, ist vor allem die Rotation für die relevante Auslenkung verantwortlich. Aus (4.36) folgt für kleine Winkel mit $\sin \varphi \approx \varphi$ und $\cos \varphi \approx 1$

$$\Delta z_2 \approx -\frac{w_M}{2} \varphi_y \quad (4.83)$$

Damit folgt aus (4.57) die Übertragungsfunktion nach Abbildung 4.8 unter der Annahme $s_x = s_y = s = j\omega + \sigma$

$$\underline{B}_1 = \frac{\underline{\zeta}}{\underline{a}} = -\frac{\Delta \underline{z}_2}{\underline{a}_x} \quad (4.84)$$

$$= \frac{w_M m (l_C - l)}{2\Theta_y} \frac{s \frac{\omega_{0x}}{Q_x} + \omega_{0x}^2}{\left(s^2 + s \frac{\omega_{0x}}{Q_x} + \omega_{0x}^2\right) \left(s^2 + s \frac{\omega_{\text{rot},0y}}{Q_{\text{rot},y}} + \omega_{\text{rot},0y}^2\right)} \quad (4.85)$$

Für die besprochene Beispielstruktur nach Tabelle 4.1 ergibt sich das in Abbildung 4.11 dargestellte berechnete Bode-Diagramm. Zur besseren graphischen Unterscheidung sind nur die beiden Extremfälle intrinsischer und viskoser Dämpfung aufgeführt. Der auf den statischen Fall normierte Übertragungsfaktor der ersten Resonanzfrequenz (rotatorisch) liegt für intrinsische Dämpfung bei 5632, für molekulare Dämpfung mit 1000 Pa (entspricht 10 mbar) bei 1642 und für viskose Dämpfung bei 34,5. Damit ist selbst bei Atmosphärendruck die Resonanz noch stark ausgeprägt.

4.3.2 Wandlung der Auslenkung in Kapazitätsänderung

Die Wandlung der Auslenkung ξ in die Kapazitätsänderung ΔC sei als frequenzunabhängig angenommen. So behalten die Gleichungen (4.42) bis (4.47) auch im dynamischen Fall grundsätzlich ihre Gültigkeit und es folgt für die Übertragungsfunktion entsprechend Abbildung 4.8

$$\underline{B}_2 = \frac{\Delta C}{\underline{\xi}} = \frac{\Delta C}{\underline{B}_1 \underline{a}_x} \quad (4.86)$$

$$= \epsilon_0 \frac{w_M^2}{2(\underline{B}_1 \underline{a}_x)^2} \ln \left(\frac{d_0^2 w_M^2 - (\underline{B}_1 \underline{a}_x)^2 w_T^2}{d_0^2 w_M^2 - (\underline{B}_1 \underline{a}_x)^2 w_M^2} \right) \quad (4.87)$$

4.4 Statisches Übertragungsverhalten des Drehratensensors

Wenn der Masseblock um zwei laterale zueinander orthogonale Achsen rotieren kann, ist die Anordnung grundsätzlich geeignet, um vertikale Drehraten $\vec{\Omega}_{\text{mess}}$ zu detektieren. Wie in Abbildung 3.10 b) dargestellt, muss

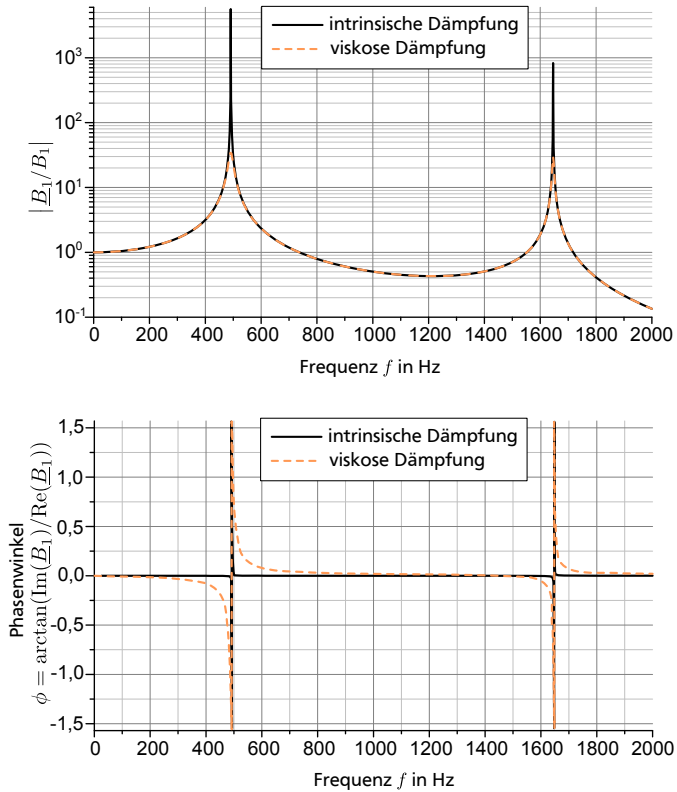


Abbildung 4.11: Berechnetes Bode-Diagramm für die Übertragungsfunktion B_1 einer Beschleunigungssensor-Struktur nach Abbildung 4.4 sowie Tabellen 4.1 und 4.2, bei dem die Übertragungsfunktion nach (4.85) auf die statische Übertragungsfunktion nach (4.41) referenziert ist.

der Masseblock um eine laterale Achse mit dem Drehimpuls \vec{L}_{antr} angetrieben werden, um über die Kopplung $\vec{M}_C = \vec{L}_{\text{antr}} \times \vec{\Omega}_{\text{mess}}$ ein Drehratenproportionales Coriolis-Moment \vec{M}_C um die andere laterale Achse zu erfahren. Bei oszillierendem $\underline{L}_{\text{antr}}$ führt das oszillierende \underline{M}_C zur oszillierenden Auslenkung ξ und somit zur oszillierenden Kapazitätsänderung ΔC , die im Signal u^* mündet. Die Wandlerkette in Abbildung 4.12 berücksichtigt das Erzeugen von $\underline{L}_{\text{antr}}$ durch das Antriebs-Moment $\underline{M}_{\text{antr}}$ sowie die Modulasi-

on des aus ΔC resultierenden Signals mit dem zu $\underline{M}_{\text{antr}}$ gehörigen Signal, sodass ein statisches Signal u^* in Abhängigkeit von Ω_{mess} entsteht.

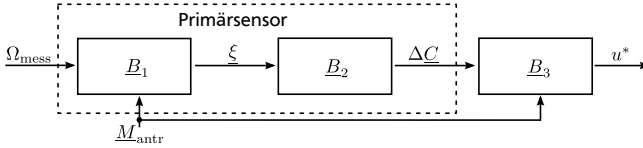


Abbildung 4.12: Wandlerkette des Drehratensensors mit statischen Größen ohne Unterstrich und oszillierenden Größen mit Unterstrich.

4.4.1 Wandlung der Drehrate in Auslenkung

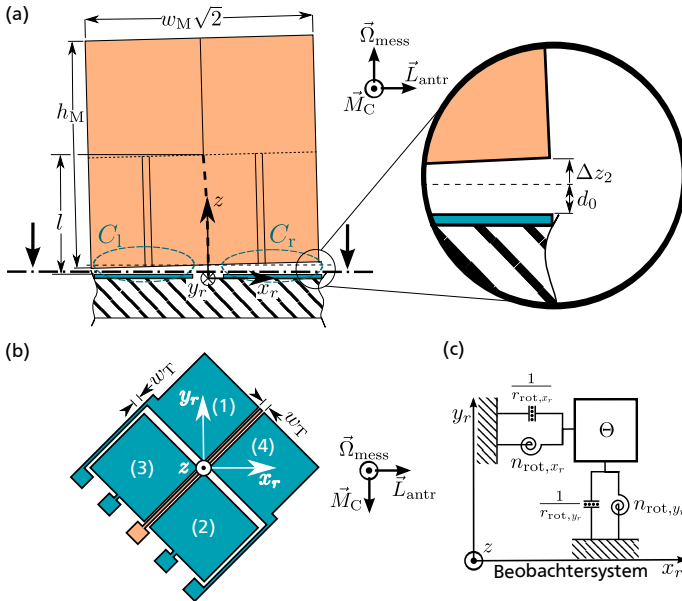


Abbildung 4.13: Eigener Ansatz zur Nutzung der Gesamtstruktur als Drehratensensor: a) Seitenansicht entsprechend Abb. 3.10 b), b) Draufsicht auf freigeschnittene Elektroden-Anordnung auf dem Substrat, c) Schematische Darstellung zur dynamischen Systembeschreibung.

Im Unterschied zur bisherigen Betrachtung in den Abschnitten 4.2 und 4.3 sei hier von einem um 45° um die z -Achse gedrehten Koordinatensystem mit den Achsen x_r , y_r und z ausgegangen, vgl. Abbildung 4.13. Außerdem habe der Masseblock nicht nur einen Graben, sondern zwei sich kreuzende – also einen kreuzförmigen Graben, vgl. Abbildung 3.10 a) und b). Um mit einem elektrostatischen Antrieb ein oszillierendes Moment $\underline{M}_{\text{antr}}$ um die x_r -Achse zu erzeugen, seien die beiden gegeneinander arbeitenden Elektroden (1) und (2) in Abbildung 4.13 b) eingesetzt. Die beiden Elektroden (3) und (4) seien zur Detektion der vom oszillierenden Coriolis-Moment \underline{M}_C erzeugten Auslenkung verwendet.

Die schematische Darstellung zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens in Abbildung 4.13 c) ergibt sich analog zu Abbildung 3.1 c). Aus dem Momentengleichgewicht und der allgemeinen Form der Übertragungsfunktion (3.59) folgt für die hier betrachtete Struktur aufgrund der Symmetrie des Biegestabs und des Masseblocks

$$\frac{\varphi_{y_r}}{\Omega_z} = - \frac{s_{x_r} \underline{M}_{\text{antr}, x_r}}{\left(s_{x_r}^2 + \frac{\omega_{\text{rot}, 0x_r}}{Q_{\text{rot}, x_r}} + \omega_{\text{rot}, 0x_r}^2 \right)^2 \Theta_{x_r}} \quad (4.88)$$

mit

$$\omega_{\text{rot}, 0x_r}^2 = \frac{1}{\Theta_{x_r} n_{\text{rot}, x_r}} = \omega_{\text{rot}, 0y_r}^2 \quad (4.89)$$

$$Q_{\text{rot}, x_r} = \frac{1}{\omega_{\text{rot}, 0x_r} n_{\text{rot}, x_r} r_{\text{rot}, x_r}} = Q_{\text{rot}, y_r} \quad (4.90)$$

$$n_{\text{rot}, x_r} = n_{\text{rot}, y} \text{ nach (4.64)} \quad (4.91)$$

$$\Theta_{x_r} = \Theta_{y_r} \quad (4.92)$$

$$s_{x_r} = s_{y_r} \quad (4.93)$$

Das Trägheitsmoment um den Drehpunkt, der am oberen Ende des Biegestabs angenommen sei, ergibt sich aus vier Komponenten, vgl. Abbildung 4.14. Dabei ist der kreuzförmige Graben im Masseblock mit der Breite w_T und der Höhe $l - d_0$ zu beachten:

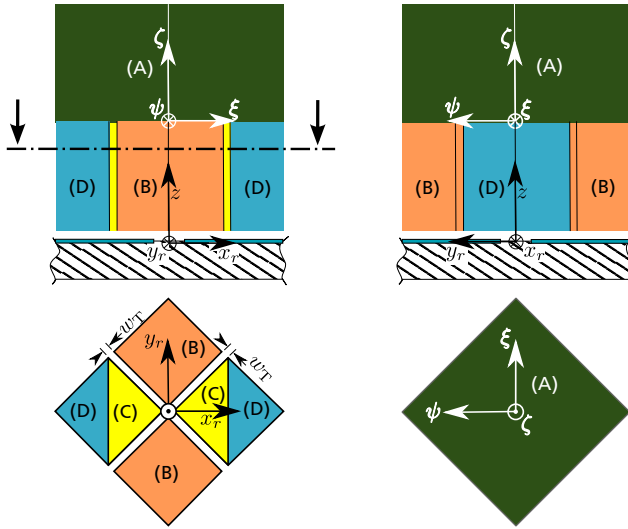


Abbildung 4.14: Segmente des Masseblocks zur Berechnung des Trägheitsmoments um die Drehachse am oberen Ende des Biegestabs, oben: Seitenansicht (links) sowie um 90° in der Ebene gedrehte Seitenansicht (rechts), unten: Draufsichten im Schnitt (links) und Draufsicht (rechts), jeweils korrespondierend zu den oben dargestellten Seitenansichten.

$$\Theta_{x_r} = \rho \int r^2 dV \quad (4.94)$$

$$= 2\rho \int_0^{\frac{w_M}{\sqrt{2}}} \int_0^{h_M - l + d_0} (w_M \sqrt{2} - 2\xi) (\xi^2 + \zeta^2) d\zeta d\xi + \quad (A)$$

$$4\rho \int_0^{\frac{w_M - w_T}{2\sqrt{2}}} \int_{-l + d_0}^0 \left(\frac{w_M - w_T}{\sqrt{2}} - 2\xi \right) (\xi^2 + \zeta^2) d\zeta d\xi + \quad (B)$$

$$2\rho \int_{\frac{w_T}{\sqrt{2}}}^{\frac{w_M + w_T}{2\sqrt{2}}} \int_{-l + d_0}^0 (-w_T \sqrt{2} + 2\xi) (\xi^2 + \zeta^2) d\zeta d\xi + \quad (C)$$

$$2\rho \int_{\frac{w_M + w_T}{2\sqrt{2}}}^{\frac{w_M}{\sqrt{2}}} \int_{-l + d_0}^0 (w_M \sqrt{2} - 2\xi) (\xi^2 + \zeta^2) d\zeta d\xi \quad (D)$$

Dämpfung

Die Resonanzgüten Q sind durch die Symmetrie der Struktur für die beiden Rotationen um die Achsen x_r und y_r identisch. Sie sind wie in Abschnitt 4.3 beschrieben vom Betriebsdruck abhängig und ergeben sich analog zu (4.70), (4.73) und (4.82):

$$Q_{\text{rot},x_r,\text{intr}} = \frac{Q_{\text{intr},\text{Stab}}}{\omega_{\text{rot},0x_r} n_{\text{rot},x_r} \sqrt{\frac{\Theta_{x_r,\text{Stab}}}{n_{\text{rot},x_r,\text{Stab}}}}} \quad (4.95)$$

$$= \frac{Q_{\text{intr},\text{Stab}}}{\omega_{\text{rot},0x_r} n_{\text{rot},y} \frac{16}{\pi d_W^3 l} \sqrt{\frac{1}{\rho E}}} \quad (4.96)$$

$$Q_{\text{rot},x_r,\text{mol}} = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi} \sqrt{\frac{R_0 T}{M}} \frac{\omega_{\text{rot},0x_r}}{I} \frac{1}{p} \quad (4.97)$$

mit

$$R_0 = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} = \text{universelle Gaskonstante} \quad [R_0] = \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

$$T = \text{Temperatur} \quad [T] = \text{K}$$

$$M = 0,0290 \frac{\text{kg}}{\text{mol}} = \text{Molmasse der Luft} \quad [M] = \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$$

$$I = \frac{w_M h_M^3 \sqrt{2} - 8w_T (l - d_0)^3}{12} \quad [I] = \text{m}^4$$

= Flächenträgheitsmoment

$$Q_{\text{rot},x_r,\text{visk}} \approx \frac{1}{\omega_{\text{rot},0x_r} n_{\text{trans},x_r,\text{visk}} r_{\text{trans},x_r,\text{visk}}} \quad (4.98)$$

mit

$$n_{\text{trans},x_r,\text{visk}} = n_{\text{rot},y} \frac{(w_M + w_T)^2}{8}$$

$$r_{\text{trans},x_r,\text{visk}} \approx \frac{1}{4} \mu \frac{(w_M - w_T)^4}{d_0^3} \left(1 - 0,58 \frac{1}{2}\right)$$

Damit ergibt sich der in Abbildung 4.15 dargestellte Verlauf der Resonanzgüte für die beiden Rotationen in Abhängigkeit des Drucks unter der Annahme $Q_{\text{intr},\text{Stab}} = 500$. Dabei gelten die gleichen Einschränkungen und Übergangseffekte wie im Abschnitt 4.3 erwähnt.

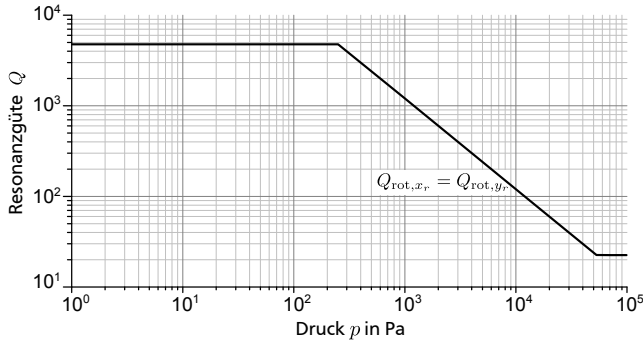


Abbildung 4.15: Berechnete Resonanzgüten der Rotationen Q_{rot,x_r} und Q_{rot,y_r} in Abhängigkeit des Drucks nach (4.95) bis (4.98) sowie Tabellen 4.1 und 4.2 unter der Annahme $Q_{\text{intr,Stab}} = 500$.

Dynamisches Übertragungsverhalten für Antrieb und Messung

Die statische Übertragungsfunktion für die angetriebene Rotation ist gleich der rotatorischen Nachgiebigkeit (4.64):

$$B_{\text{antr}} = \frac{\varphi_{x_r}}{M_{\text{antr},x_r}} = n_{\text{rot},y} \quad (4.99)$$

Für die dynamische Übertragungsfunktion der angetriebenen Rotation folgt aus (3.56):

$$\underline{B}_{\text{antr}} = \frac{\varphi_{x_r}}{\underline{M}_{\text{antr}}} = \frac{1/\Theta_{x_r}}{s_{x_r}^2 + \frac{\omega_{\text{rot},0x_r}}{Q_{\text{rot},x_r}} s_{x_r} + \omega_{\text{rot},0x_r}^2} \quad (4.100)$$

Diese ist von der in Abbildung 4.15 dargestellten Güte abhängig. Daher ergibt sich das berechnete Bode-Diagramm nach Abbildung 4.16. Zur besseren graphischen Unterscheidung sind nur die beiden Extremfälle intrinsischer und viskoser Dämpfung aufgeführt. Der auf den statischen Fall normierte Übertragungsfaktor liegt bei Resonanz für intrinsische Dämpfung bei 4808, für molekulare Dämpfung mit 1000 Pa (10 mbar) bei 1215 und für viskose Dämpfung bei 22,65. Damit ist selbst bei Atmosphärendruck die Resonanz noch stark ausgeprägt.

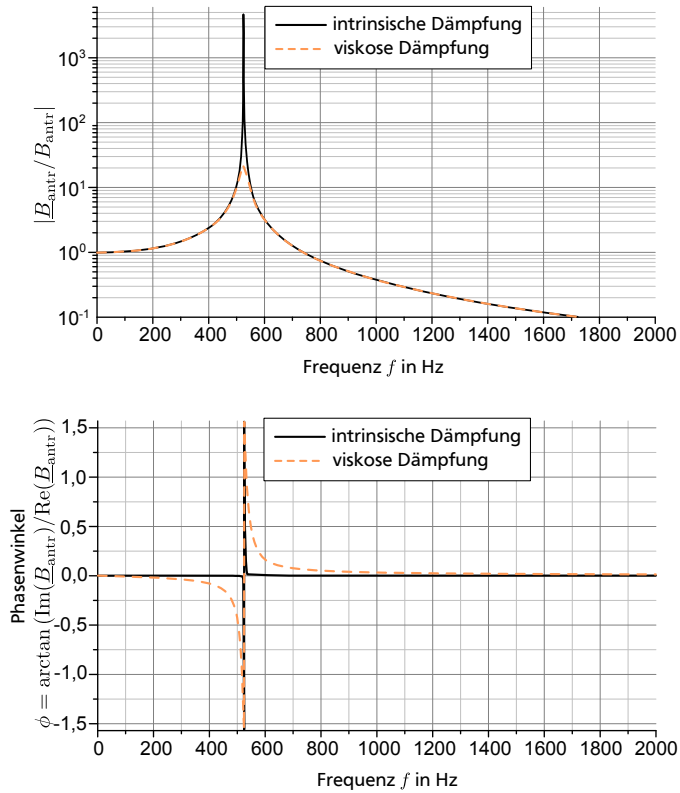


Abbildung 4.16: Berechnetes Bode-Diagramm für die angetriebene Rotation einer Drehratensensorstruktur nach Abbildung 4.13 a) und b) sowie Tabellen 4.1 und 4.2.

Weiterhin lässt sich aus (4.88) und (4.100) die Übertragungsfunktion für die Messung der Drehrate herleiten

$$\underline{B}_{\text{mess}} = \frac{\varphi_{y_r}}{\varphi_{x_r}} \frac{1}{\Omega_z} = - \frac{s_{x_r}}{s_{x_r} + \frac{\omega_{\text{rot},0x_r}}{Q_{\text{rot},x_r}} + \omega_{\text{rot},0x_r}^2} \quad (4.101)$$

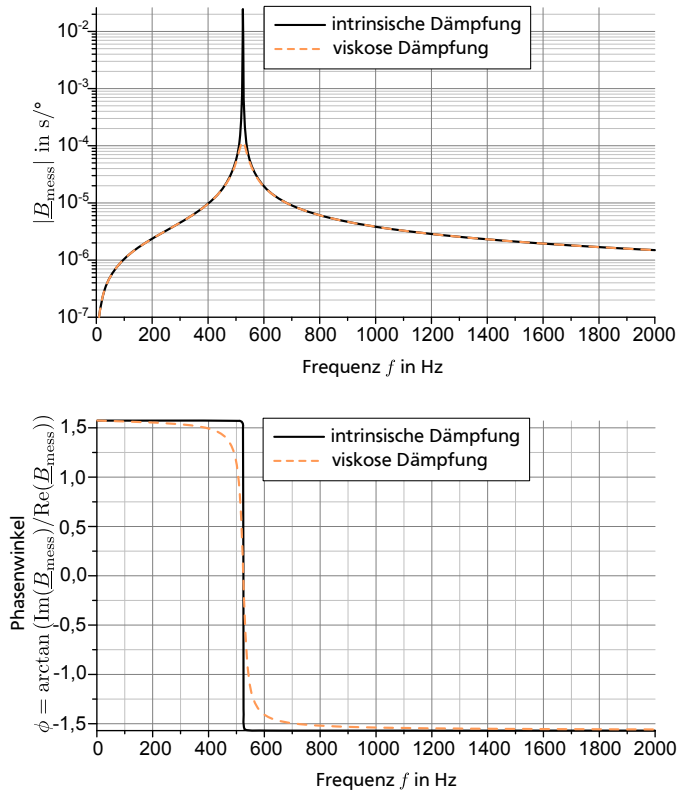


Abbildung 4.17: Berechnetes Bode-Diagramm der Übertragungsfunktion $\underline{B}_{\text{mess}}$ für die Messung der Drehrate bei einer Struktur nach Abbildung 4.13 a) und b) sowie Tabellen 4.1 und 4.2 mit der Anregungsamplitude $\varphi_{x_r, \text{const}}$ nach (4.102).

Hier sei zunächst eine konstante Antriebs-Amplitude vorausgesetzt, die am äußeren Ende des Masseblocks zur Halbierung des Luftspalts führt:

$$\varphi_{x_r, \text{const}} = \frac{d_0}{w_M \sqrt{2}} \quad (4.102)$$

Damit lässt sich das Bode-Diagramm der Übertragungsfunktion für die Messung der Drehrate bei unterschiedlicher Dämpfung bestimmen, vgl. Abbil-

derung 4.17. Bei Annäherung der Betriebsfrequenz f an 0 Hz sinkt der Übertragungsfaktor stark ab, da dann durch den geringen Drehimpuls L_{antr} kaum noch ein Coriolis-Moment M_C auftritt. Im Resonanzfall liegt der Übertragungsfaktor für intrinsische Dämpfung bei $15,1 \cdot 10^{-3} \text{ s/}^\circ$, für molekulare Dämpfung mit 1000 Pa (10 mbar) bei $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ s/}^\circ$ und für viskose Dämpfung bei $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ s/}^\circ$. Also ist auch hier die Resonanz selbst bei viskoser Dämpfung unter Atmosphärendruck stark ausgeprägt.

Dimensionierung des Antriebs

Um die in (4.102) vorausgesetzte konstante Antriebs-Amplitude zu realisieren, ist eine detaillierte Analyse des Antriebsmechanismus nötig. Durch das elektrostatische Wirkprinzip sind nur anziehende Kräfte möglich, hier zwischen den Flächen auf der Unterseite des Masseblocks und den im geringen Abstand d gegenüberliegenden Elektroden auf der Substratoberfläche. Man nehme an, dass von der in Abbildung 4.13 b) oben dargestellten Elektrode (1) und von der unten dargestellten Elektrode (2) abwechselnd anziehende Kräfte ausgehen. Dadurch entsteht ein oszillierendes Moment um die x_r -Achse, das den Masseblock zum rotierenden „Wippen“ bringt.

Für jede der beiden Elektroden (1) und (2) jeweils mit der gegenüberliegenden Fläche auf der Unterseite des Masseblocks lässt sich die elektrostatische Kraft in vertikaler Richtung auf ein infinitesimales Flächenstück berechnen [637]. Nimmt man die Breite des Flächenstücks $\delta(y_r)$ in x_r -Richtung als symmetrisch um die y_r -Achse an, folgt für die Kraft:

$$dF_z = \frac{1}{2} \varepsilon_0 U^2 \frac{\delta(y_r)}{d^2(y_r)} dy_r \quad (4.103)$$

mit

dy_r = infinitesimale Tiefe des Flächenstücks in y_r -Richtung

$\delta(y_r)$ = Breite des Flächenstücks in x_r -Richtung

$d(y_r)$ = Luftspaltdicke

U = el. Spannung zw. Elektrode (1) bzw. (2) und Masseblock

Daraus resultiert für die oben dargestellte Elektrode (1) ein infinitesimales Moment um die x_r -Achse

$$dM_{\text{antr}, x_r, (1)} = -y_r dF_z \quad (4.104)$$

Integriert man über die gesamte Elektrode, ergibt sich das Moment

$$M_{\text{antr},x_r,(1)} = -\frac{\varepsilon_0 u^2}{d_0^2} \left(\int_{\frac{w_T}{\sqrt{2}}}^{\frac{w_M+w_T}{2\sqrt{2}}} \frac{\left(y_r - \frac{w_T}{\sqrt{2}}\right) y_r}{\left(\frac{\varphi_{x_r}}{d_0} y_r + 1\right)^2} dy_r + \right. \quad (4.105)$$

$$\left. \int_{\frac{w_M+w_T}{2\sqrt{2}}}^{\frac{w_M}{\sqrt{2}}} \frac{\left(\frac{w_T}{\sqrt{2}} - y_r\right) y_r}{\left(\frac{\varphi_{x_r}}{d_0} y_r + 1\right)^2} dy_r \right)$$

Das von der unteren Elektrode (2) hervorgerufene Moment ergibt sich analog mit umgekehrtem Vorzeichen.

Abbildung 4.18 a) stellt die Abhängigkeit der beiden Antriebs-Momente $M_{\text{antr},x_r,(1)}$ und $M_{\text{antr},x_r,(2)}$ vom Antriebs-Winkel φ_{x_r} bei konstanter Antriebs-Spannung dar. Die reziprok quadratische Abhängigkeit von der Luftspaltdicke in (4.103) führt zu starkem Ansteigen des Moments bei Annäherung des Masseblocks an die Elektroden auf dem Substrat bzw. starkem Abfallen des Moments bei Entfernung.

Um zu abwechselnd anziehenden Kräften zu gelangen, muss die Antriebs-Spannung zwischen den Elektroden auf dem Substrat und dem Masseblock zumindest kommutiert werden. Der Zeitpunkt des Umschaltens richtet sich dabei nach der Phasenverschiebung zwischen M_{antr,x_r} und φ_{x_r} , vgl. Abbildung 4.16 unten. Bei *Resonanz* liegt 180° Phasenverschiebung vor, sodass sich für die Systembeschreibung unter Voraussetzung von Linearität und Zeitinvarianz (LTI) ein Soll-Verlauf des Antriebs-Moments $M_{\text{antr},x_r,\text{soll,res}}$ ergibt wie in Abbildung 4.18 a) dargestellt. Für diesen Verlauf des Moments ist einerseits das Kommutieren der Antriebs-Spannung u nötig:

Elektrode (1): $\varphi_{x_r} < 0 \rightarrow u \neq 0, \varphi_{x_r} > 0 \rightarrow u = 0$

Elektrode (2): $\varphi_{x_r} < 0 \rightarrow u = 0, \varphi_{x_r} > 0 \rightarrow u \neq 0$

Andererseits bedarf der Soll-Verlauf des Antriebs-Moments einer Antriebs-Winkel-abhängigen Variation des Betrags. Abbildung 4.18 b) stellt die Lösungsmöglichkeiten der Spannungsverläufe an den beiden Elektroden in Bezug auf den Masseblock (Massepotential) in Abhängigkeit des Antriebs-Winkels φ_{x_r} dar. Um das elektrostatische Aufladen des Masseblocks und der Elektroden auf dem Substrat zu verhindern, kann beispielsweise nach jedem

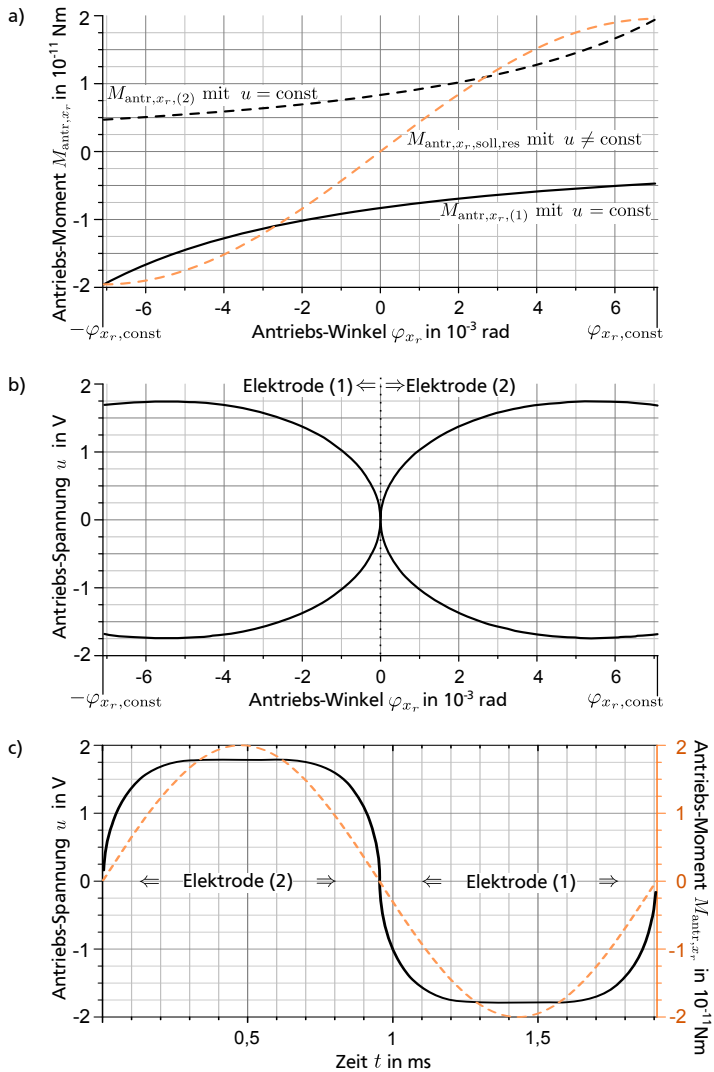


Abbildung 4.18: Berechnetes Systemverhalten in Resonanz bei intrinsischer Dämpfung mit Parametern nach Abb. 4.13 und Tab. 4.1: a) M_{antr,x_r} der Elektroden (1) und (2) für $u = \text{const}$ sowie Soll-Verlauf von M_{antr,x_r} , b) u für Soll-Verlauf von M_{antr,x_r} , c) u und Soll-Verlauf von M_{antr,x_r} über der Zeit.

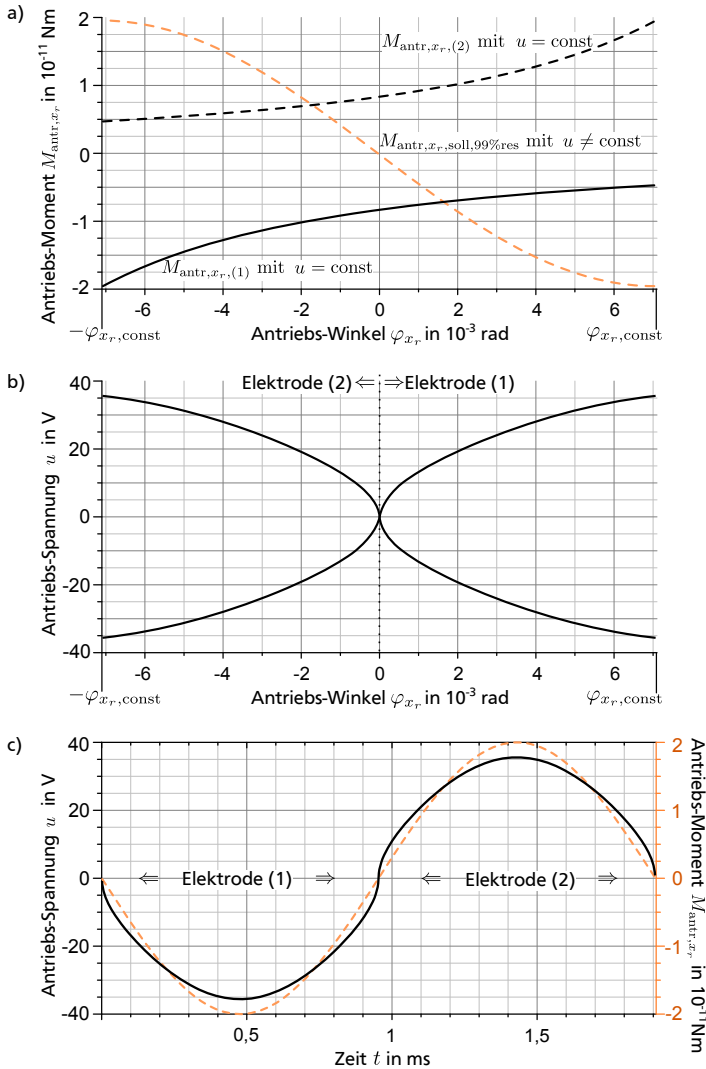


Abbildung 4.19: Berechnetes Systemverhalten bei $\omega_{\text{rot},x_r} = 0,99 \cdot \omega_{\text{rot},0x_r}$ und molekularer Dämpfung bei 1000 Pa (10 mbar) mit Parametern nach Abb. 4.13 und Tab. 4.1: a) M_{antr,x_r} der Elektroden (1) und (2) für $u = \text{const}$ sowie Soll-Verlauf von M_{antr,x_r} , b) u für Soll-Verlauf von M_{antr,x_r} , c) u und Soll-Verlauf von M_{antr,x_r} über der Zeit.

zweiten Nulldurchgang das Signal um 180° in seiner Phasenlage verschoben werden. Daraus folgt der in Abbildung 4.18 c) dargestellte Verlauf des Antriebs-Moments und der Antriebs-Spannung in Abhängigkeit der Zeit.

Der *Resonanzbetrieb* ermöglicht große Antriebs-Amplituden φ_{x_r} bei geringen Antriebs-Spannungen U sowie große Übertragungsfaktoren B_{mess} zur Messung der Drehrate. Treffen Fertigungstoleranzen auf, verschieben sich die Resonanzfrequenzen $\omega_{\text{rot},0x_r}$ und $\omega_{\text{rot},0y_r}$, was durch individuelles Trimmen der Sensorelektronik angepasst werden kann. Nicht ausgleichen lässt sich jedoch die Differenz der Resonanzfrequenzen, die im Zuge der Vereinfachungen zu null angenommen wurde. An anderer Stelle [435, 637] werden diese Frequenzen gezielt unterschiedlich gewählt, vor allem um unerwünschte Kopplungseffekte zwischen Schwingungsmodi mehrerer Masseelemente zu reduzieren, was hier jedoch nicht betrachtet werden soll. Darüber hinaus treten im Betrieb auch Alterungseffekte auf, die zu nicht ohne weiteres korrigierbaren Verschiebungen der Resonanzfrequenz führen können. Durch den steilen Verlauf der Kurven in Abbildung 4.16 und 4.17 sehr nahe der Resonanzfrequenz führen schon geringe Frequenzverschiebungen zu deutlichen Änderungen. Daher kann ein *Betrieb außerhalb Resonanz* – aber unweit der Resonanz – sinnvoll sein, wobei man geringere Übertragungsfaktoren B_{mess} und höhere Antriebs-Spannungen U toleriert, um einen stabileren Betrieb zu gewährleisten. Gleichzeitig gewinnt man an Dynamik für die Detektion der Drehrate, die im Resonanzfall nach (4.88) theoretisch bei 0 Hz liegt [637].

Darüber hinaus ist die Vakuumgehäuseung aufwendig und vereinfacht sich mit größerem Vakuum. Im Folgenden sei daher ein *Betriebsdruck von 10 mbar* vorausgesetzt, sodass molekulare Dämpfung auftritt. Der Verlust an Resonanzgüte wirkt sich durch den Betrieb außerhalb der Resonanz weniger stark aus als beim Betrieb in Resonanz.

Für den *Betrieb bei 99% der Resonanzfrequenz und bei 10 mbar* ergeben sich vom oben beschriebenen Resonanzfall mit intrinsischer Dämpfung abweichende Voraussetzungen für das Antriebs-Moment. Die Phasenverschiebung zwischen φ_{x_r} und $\underline{M}_{\text{antr},x_r}$ beträgt lediglich $-2,3^\circ$. Sie kann daher in erster Näherung zu null angenommen werden. Abweichend von Abbildung 4.18 a) ergibt sich der in Abbildung 4.19 a) dargestellte Zusammenhang für den Sollverlauf des Moments. Die zu null angenommene Phasenverschiebung verlagert den Soll-Verlauf des Antriebs-Moments hin zu niedrigeren Beträgen der Antriebs-Momente, die die Elektroden (1) und (2) bewirken

können: Anziehende Kraft soll aufgebracht werden, wenn der Luftspalt besonders groß ist. Deutlich größer ist jedoch der Einfluss des geringeren Übertragungsfaktors B_{antr} , sodass sich das in Abbildung 4.19 b) dargestellte Bild der Antriebs-Spannung ergibt. Damit folgt abschließend der in Abbildung 4.18 c) dargestellte Verlauf des Antriebs-Moments und der Antriebs-Spannung in Abhängigkeit der Zeit. Auch hier ist es sinnvoll, die elektrostatische Aufladung durch beispielsweise eine Phasenverschiebung des Signals von 180° nach jedem zweiten Nulldurchgang das Signal zu minimieren.

Die Amplitude der Antriebs-Spannung liegt mit $35,7\text{V}$ bei $\omega_{\text{rot},x_r} = 0,99 \cdot \omega_{\text{rot},0x_r}$ und molekularer Dämpfung etwa um den Faktor 20 höher als im resonanten Fall bei intrinsischer Dämpfung. Dadurch entsteht am Ort des geringsten Luftspalts nahe des Biegestabs (ca. d_0) ein elektrisches Feld von

$$E < \frac{u}{d_0} = 3,57 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}} \quad (4.106)$$

Zur Einschätzung der Gefahr, die Durchschlagsfeldstärke zu überschreiten, sei auf [641] verwiesen. Dort ist das Durchschlagsverhalten bei geringen Spaltabständen unter Atmosphärendruck und unter Vakuum beschrieben:

Atmosphärendruck der Luft: Bei Spaltabständen $d \approx 200\text{nm}..4\mu\text{m}$ herrschen Durchschlagsfeldstärken von $E \approx 65\text{V}/\mu\text{m}..110\text{V}/\mu\text{m}$, abhängig von der Elektrodengeometrie und der Elektrodenrauigkeit. Im Übergangsbereich von $d \approx 4\mu\text{m}..6\mu\text{m}$ sinkt die Durchschlagsfeldstärke ab und das Verhalten der Durchschlagsspannung U_{BR} nähert sich dem Minimum des Paschen-Gesetzes [642] an, dem „**Paschenminimum**“: 300V bei $d \approx 5\mu\text{m}..10\mu\text{m}$, entsprechend $E \approx 30..60\text{V}/\mu\text{m}$. Bei Spaltabständen $d \approx 6\mu\text{m}..25\mu\text{m}$ gilt das Paschen-Gesetz mit der lokal linearisierten Durchschlagsspannung von etwa $U_{\text{BR}} = 270\text{V} + d \cdot 6,4\text{V}/\mu\text{m}$. Für hier nicht mehr relevante Spalte $d > 25\mu\text{m}$ gilt das Paschen-Gesetz mit einem etwas steileren Verlauf von U_{BR} .

Vakuum ($0,1 - 10\text{mPa}$): Die Durchschlagsfeldstärke für Spaltabstände von $35\mu\text{m}$ bis $200\mu\text{m}$ liegt bei etwa $97\text{V}/\mu\text{m}$.

Beim hier betrachteten Luftdruck von 1000Pa ist zu erwarten, dass sich ein Verhalten ähnlich dem bei Atmosphärendruck einstellt, jedoch mit einer höheren Obergrenze des Spaltabstands, bei denen Durchschlagfeldstärken von

65 V/μm bis 110 V/μm gelten. Beide Werte liegen deutlich oberhalb von 3,57 V/μm (4.106), sodass die Ausbildung eines Lichtbogens ausgeschlossen werden kann.

Übertragungsfaktor

Um die Übertragungsfunktionen bei Resonanz und außerhalb Resonanz quantitativ vergleichen zu können, sei folgende Annahme für kleine Winkel getroffen mit Δz_2 nach Abbildung 4.13 a):

$$\Delta \underline{z}_2 \approx -\frac{w_M}{\sqrt{2}} \varphi_{y_r} \quad (4.107)$$

Damit folgt aus (4.101)

$$\underline{B}_1 = \frac{\underline{\zeta}}{\Omega_{\text{mess}}} = -\frac{\Delta \underline{z}_2}{\Omega_z} \quad (4.108)$$

$$= -\frac{w_M \varphi_{x_r}}{\sqrt{2}} \frac{s_{x_r}}{s_{x_r}^2 + \frac{\omega_{\text{rot},0x_r}}{Q_{\text{rot},x_r}} s_{x_r} + \omega_{\text{rot},0x_r}^2} \quad (4.109)$$

Mit einer konstanten Antriebs-Amplitude nach (4.102) ergeben sich die in Abbildung 4.20 a) und b) dargestellten Auslenkungen in Abhängigkeit der Drehrate: Im Resonanzbetrieb ist die Empfindlichkeit deutlich größer, im Betrieb bei 99% der Resonanzfrequenz ist der Messbereich der Drehrate deutlich größer.

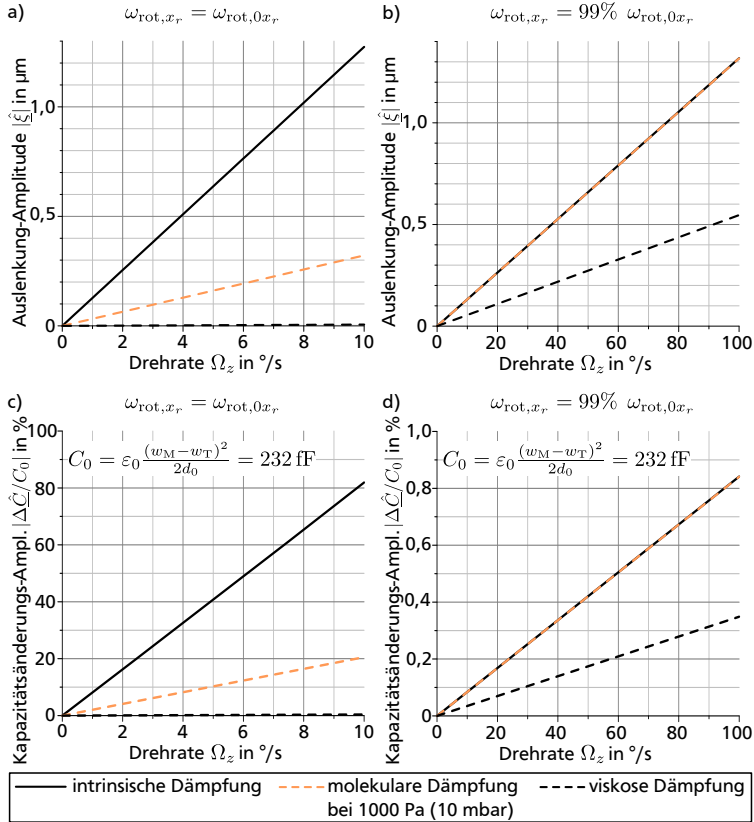


Abbildung 4.20: Berechnete Amplituden mit Parametern nach Abbildung 4.13 und Tabelle 4.1 und $Q_{\text{intr,Stab}} = 500$: Auslenkungs-Amplitude am unteren äußeren Ende des Masseblocks für a) $\omega_{\text{rot},x_r} = \omega_{\text{rot},0x_r}$ und b) $\omega_{\text{rot},x_r} = 0,99 \cdot \omega_{\text{rot},0x_r}$; Relative Kapazitätsänderungs-Amplitude für c) $\omega_{\text{rot},x_r} = \omega_{\text{rot},0x_r}$ und d) $\omega_{\text{rot},x_r} = 0,99 \cdot \omega_{\text{rot},0x_r}$.

4.4.2 Wandlung der Auslenkung in Kapazitätsänderung

Bei einer Rotation um die y_r -Achse mit dem positiven Winkel φ_{y_r} nähert sich der Masseblock der Elektrode (4) in Abbildung 4.13 b) an und entfernt sich von Elektrode (3). Durch die differentiell kapazitive Anordnung folgt für $|\Delta z_2| < d_0$ bzw. $\left| \frac{w_M}{\sqrt{2}} \varphi_{-y_r} \right| < d_0$ allgemein formuliert

$$\Delta \underline{C} = \underline{C}_r - \underline{C}_l \quad (4.110)$$

$$= 2\varepsilon_0 \varepsilon_r \left(\overbrace{\int_{\frac{w_T}{\sqrt{2}}}^{\frac{w_M+w_T}{2\sqrt{2}}} \frac{x_r - \frac{w_T}{\sqrt{2}}}{d_0 - \varphi_{-y_r} x_r} dx_r + \int_{\frac{w_M+w_T}{2\sqrt{2}}}^{\frac{w_M}{\sqrt{2}}} \frac{\frac{w_M}{\sqrt{2}} - x_r}{d_0 - \varphi_{-y_r} x_r} dx_r}^{\text{Elektrode (4)}} - \underbrace{\int_{-\frac{w_M+w_T}{2\sqrt{2}}}^{-\frac{w_T}{\sqrt{2}}} \frac{-x_r - \frac{w_T}{\sqrt{2}}}{d_0 - \varphi_{-y_r} x_r} dx_r - \int_{-\frac{w_M}{\sqrt{2}}}^{-\frac{w_M+w_T}{2\sqrt{2}}} \frac{\frac{w_M}{\sqrt{2}} + x_r}{d_0 - \varphi_{-y_r} x_r} dx_r}_{\text{Elektrode (3)}} \right) \quad (4.111)$$

Geht man von Vakuum oder Luft im Spalt aus, ergibt sich die Übertragungsfunktion \underline{B}_2 entsprechend Abbildung 4.12 zu

$$\underline{B}_2 = \frac{\Delta \underline{C}}{\underline{\xi}} = - \frac{\Delta \underline{C}}{\underline{B}_1 \Omega_z} \quad (4.112)$$

Bezieht man die Kapazitätsänderung auf die Grundkapazität $C_0 = \varepsilon_0 \frac{(w_M - w_T)^2}{2d_0}$, folgt der in Abbildung 4.20 c) und d) dargestellte Zusammenhang zwischen relativer Kapazitätsänderung und Drehrate für den Betrieb in Resonanz und unweit der Resonanz.

4.5 Auslegung des Technologie-Demonstrators zur Beschleunigungsmessung

Die in Abbildung 3.10 dargestellten Konfigurationen sind hinsichtlich ihres grundsätzlichen Aufbaus sehr ähnlich. Daher soll hier zunächst der einfachste Fall für einachsige, laterale Beschleunigungsmessung betrachtet werden. Wie einleitend in Abschnitt 4.2 dargestellt, soll dafür der Messbereich bei $a_x = \pm 10 \text{ g}$ liegen.

Der Technologie-Demonstrator basiert in jedem Fall auf einem einzelnen senkrechten Metallzylinder mit einem daran angekoppelten Masseblock. Wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt, lassen sich 1-D-Federelemente im Rahmen dieser Arbeit nicht aus einzelnen Nanodrähten fertigen, sodass Nanodrähte nur perspektivisch zum Einsatz kommen können. Aus prozesstechnischen Untersuchungen zur Fertigung einzelner, senkrechter Metallzylinder [21, 24, 42, 43, 47, 643] lassen sich zwei Gruppen von Technologie-Demonstratoren definieren:

UV LIGA: Mit Hilfe von UV-Lithographie des Photoresists AZ 125nXT und Galvanoformung lassen sich Kupferzylinder mit einem maximalen Aspektverhältnis von $AR = l/d_w = 14,5$ realisieren. Die bevorzugte Länge des Zylinders liegt bei $400 \text{ }\mu\text{m}$.

Röntgen LIGA: Mit Hilfe von Synchrotron-Röntgen-Lithographie des Photoresists SU-8 mrl und Galvanoformung lassen sich Kupferzylinder mit einem maximalen Aspektverhältnis von $AR = l/d_w = 70$ realisieren. Die bevorzugte Länge des Zylinders liegt bei $100 \text{ }\mu\text{m}$.

Vorgreifend auf Kapitel 5 folgen aus weiteren technologischen Randbedingungen die in Tabelle 4.3 dargestellten Parameterbereiche für die beiden Technologie-Demonstratoren-Gruppen.

Aus der Annahme des Messbereichs von $a_x = \pm 10 \text{ g}$ lässt sich ableiten, bei welcher Beschleunigung der Spaltabstand am äußeren Ende $d_0 + \Delta z_2$ nach Abbildung 4.4 b) zu null werden muss. Sind die Gegenelektroden nicht mit einem Isolator belegt, tritt in diesem Grenzfall ein elektrischer Kurzschluss zwischen dem Masseblock (Zentralelektrode) und einer Gegenelektrode auf, sodass der Grenzfall streng genommen nicht mehr zum Messbereich gehören darf. Allerdings lässt sich an dieser Stelle noch kein begründeter Abstand zu diesem Grenzfall definieren. Es sei also vereinfachend angenommen, dass

Tabelle 4.3: Technologische Randbedingungen für die Realisierung von zwei Gruppen einer Struktur nach Abbildung 4.4 b) aus Kupfer.

Größe	d_0 in μm	E in GPa	ρ in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Beide Gruppen	8	129,8	8,96
Größe	l in μm	d_W in μm	w_T in μm
UV LIGA	400	30 bis 50	≥ 150
Röntgen LIGA	100	3 bis 7	≥ 30

bei $a_x = \pm 10 g$ gelte $d_0 + \Delta z_2 = 0$. Mit dieser Bedingung lassen sich die beiden Technologie-Demonstratoren-Gruppen auslegen.

4.5.1 UV LIGA

Für Strukturen, die mit Hilfe von UV-Lithographie und anschließender Galvanoformung hergestellt werden, ergibt sich die in Abbildung 4.21 dargestellte Situation. Bei der Berechnung wird die Masseblock-Höhe h_M vom theoretisch niedrigsten Wert, der Stablänge $l = 400 \mu\text{m}$, bis zum 2,5-fachen dieses Werts variiert. Um die Bedingung $d_0 + \Delta z_2 = 0$ bei $a_x = \pm 10 g$ zu erfüllen, folgt mit (4.38) für jedes h_M genau eine Lösung für die Masseblock-Breite w_M . Die Stabdurchmesser d_W können bei diesen Technologie-Demonstratoren sinnvollerweise im Bereich $30 \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$ liegen; daher folgt in der Darstellung eine Kurvenschar. Für jeden Punkt auf dieser Kurvenschar lässt sich die Knicksicherheit bezogen auf die vertikale Fallbeschleunigung $S_{k,1g}$ nach (4.1) und (4.60) berechnen.

Für die Fertigung verschiedener Technologie-Demonstratoren auf einem Substrat ist die Masseblock-Höhe für alle Typen der Technologie-Demonstratoren-Gruppe gleich zu wählen. Um diese auszuwählen, sind die technologische Realisierbarkeit, die laterale Größe des Demonstrators und damit die Grundkapazität sowie die Knicksicherheit gegeneinander abzuwiegen. Die Masseblock-Höhe $h_M = 800 \mu\text{m}$ vereint die technologische Realisierbarkeit mit Knicksicherheiten von $S_{k,1g} = 994$ bis 1867. Die Grundkapazitäten der Technologie-Demonstratoren setzen sich aus den Parallelschaltungen der Teil-Kondensatoren links und rechts zusammen. Bei den Masseblock-Breiten von $w_M = 1,12 \text{ mm}$ bis $2,22 \text{ mm}$ liegen sie zwischen $C_0 = 1,1 \text{ pF}$ und $4,9 \text{ pF}$. Damit sind die Messelemente klein genug um mehrere Hundert

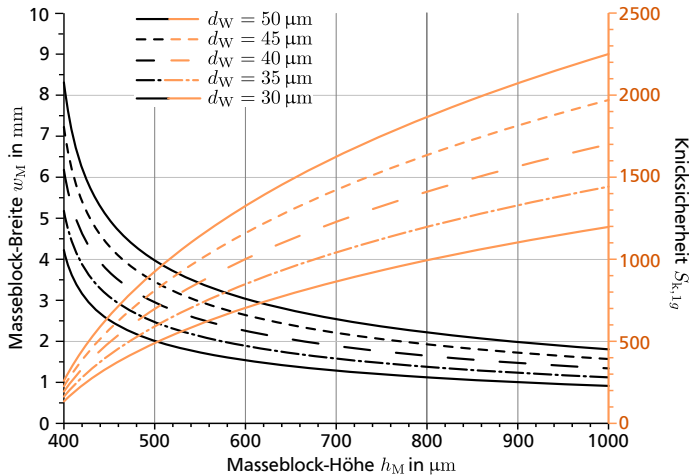


Abbildung 4.21: Auslegung der Masseblock-Höhe h_M für die Technologie-Demonstratoren-Gruppe UV LIGA und den Messbereich $a_x = \pm 10 \text{ g}$ mit den Parametern nach Tabelle 4.3 und der Spaltbreite $w_T = 220 \text{ µm}$.

auf einem 100 mm-Wafer fertigen zu können und die Grundkapazität liegt in einem messtechnisch gut erfassbaren Bereich.

Stabilität

Für diese Konfiguration sind die Kriterien für Stabilität nach Abschnitt 4.1 zu prüfen:

Druckbelastung: Situationen nicht idealer Verhältnisse sind für die Druckbelastung am kritischsten. Bei den lithographisch definierten Strukturen kann etwa durch einen lateralen Justagefehler ein außenmittiger Kraftangriff nach Abbildung 4.1 c) auftreten. Um von der Druckbelastung hervorgerufene Durchbiegungen am Ende des Stabs w_l kleiner als den Justagefehler zu halten, muss die Beschleunigung des Technologie-Demonstrators in positive z -Richtung a_z begrenzt werden. Nach Abbildung E.9 sollte sie $0,4 \text{ g} \cdot S_{k,1g}$ nicht überschreiten. Dies entspricht Beschleunigungen von $|a_z| = 398 \text{ g}$ ($d_W = 30 \text{ µm}$) und $|a_z| = 747 \text{ g}$ ($d_W = 50 \text{ µm}$) und ist daher nicht als kritisch anzusehen. Überschreitet die Beschleunigung diese Werte, kann im Ex-

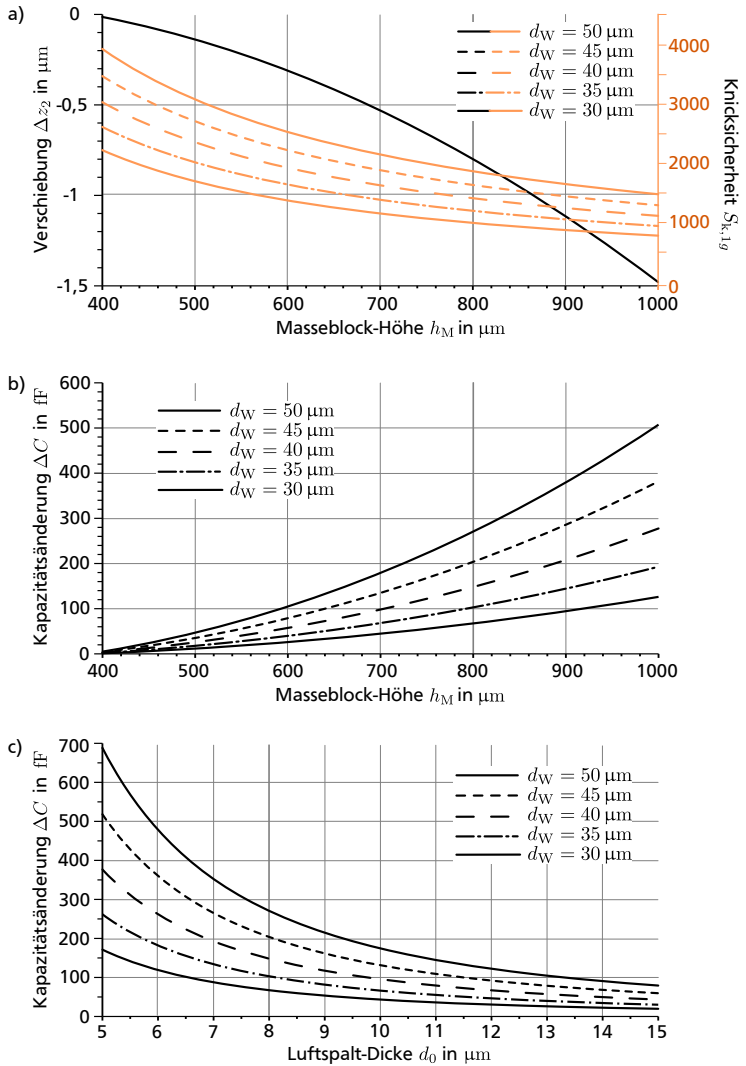


Abbildung 4.22: Einfluss der Parameter h_M und d_0 auf die Technologie-Demonstratoren-Gruppe UV LIGA mit der Masseblock-Höhe $h_M = 800 \mu\text{m}$, den Parametern nach Tabelle 4.3 und der Spaltbreite $w_T = 220 \mu\text{m}$ bei der aktuell wirksamen lateralen Beschleunigung $a_x = 1 \text{ g}$ und der Bedingung $|\Delta z_2| = 0,8 \mu\text{m}$.

tremfall der Masseblock in Kontakt mit den Gegenelektroden geraten, was jedoch nicht gleichbedeutend mit einem Defekt der Struktur ist.

Zugbelastung: Wie in Abbildung 4.2 dargestellt, hängt die Grenze der elastischen Dehnung vom Aspektverhältnis des Stabs und seinem Material ab. Für in negative z -Richtung beschleunigte Technologie-Demonstratoren aus weichem Kupfer liegt sie zwischen $|a_z| = 477 \text{ g}$ ($d_W = 30 \mu\text{m}$) und $|a_z| = 323 \text{ g}$ ($d_W = 50 \mu\text{m}$). Für solche aus hartem Kupfer liegt sie zwischen $|a_z| = 2383 \text{ g}$ ($d_W = 30 \mu\text{m}$) und $|a_z| = 1611 \text{ g}$ ($d_W = 50 \mu\text{m}$). Bei weichem Kupfer liegt die elastische Längung bei maximal $|\Delta z_l| = 166 \text{ nm}$, bei hartem Kupfer bei maximal $|\Delta z_l| = 832 \text{ nm}$. Welche Materialparameter für Kupfer bei der technologischen Umsetzung zum Tragen kommen, hängt von den Abscheidebedingungen der Galvanoformung ab. Die beiden Fälle Cu (weich) und Cu (hart) sind hier zur Orientierung aufgeführt.

Biegebelastung: Aus (4.7) und (4.21) lässt sich eine Begrenzung für die vertikale Verschiebung der linken und rechten, unteren Außenkante am Masseblock definieren:

$$|\Delta z_2| < \frac{w_M \left(l_c - \frac{l}{2} \right) \sigma_{\text{Fließgr.}}}{d_W E} \quad (4.113)$$

Für lateral beschleunigte *UV-LIGA* Technologie-Demonstratoren aus Kupfer ergibt sich somit:

	$d_W = 30 \mu\text{m}$	$d_W = 50 \mu\text{m}$
Cu weich	$ \Delta z_2 = 3,6 \mu\text{m}$	$ \Delta z_2 = 4,0 \mu\text{m}$
Cu hart	$ \Delta z_2 = 17,9 \mu\text{m}$	$ \Delta z_2 = 20,2 \mu\text{m}$

Im Grenzfall $a_x = \pm 10 \text{ g}$ gilt $|\Delta z_2| = d_0 = 8 \mu\text{m}$, womit hartes Kupfer die Bedingungen elastischen Verhaltens erfüllt, weiches jedoch nicht. Die Bedingung elastischen Verhaltens im Grenzfall $a_x = \pm 10 \text{ g}$ ist für Fließgrenzen $\sigma_{\text{Fließgr.}} > 121 \text{ MPa}$ ($d_W = 30 \mu\text{m}$) bzw. $\sigma_{\text{Fließgr.}} > 107 \text{ MPa}$ ($d_W = 50 \mu\text{m}$) erfüllt. Oberhalb dieser lateralen Beschleunigungen findet keine weitere Biegung statt, da sich der Masseblock im Anschlag befindet. Im Anschlag tritt jedoch durch die Verlagerung des Drehpunkts auf die untere Außenkante am Masseblock eine Zugbelastung im Stab auf. Sie führt allerdings selbst bei $a_x = \pm 500 \text{ g}$ nur zu moderat erhöhten Vergleichsspannungen nach (4.6) von $\sigma_V =$

128 MPa ($d_W = 30 \mu\text{m}$) und $\sigma_V = 112 \text{ MPa}$ ($d_W = 50 \mu\text{m}$). Nicht berücksichtigt bei dieser Betrachtung ist ein Verrutschen der aufliegenden Masseblock-Außenkante auf dem Substrat.

Torsionsbelastung: Aus (4.10) und dem Massenträgheitsgesetz der Rotation $M_z = \Theta_z \dot{\Omega}_z$ lässt sich eine Begrenzung für die Drehbeschleunigung ableiten:

$$|\dot{\Omega}_z|_{\max} < \frac{\pi}{16\sqrt{3}} \frac{d_W^3}{\Theta_z} \sigma_{\text{Fließgr.}} \quad (4.114)$$

$$\text{mit } \Theta_z = \rho \int r^2 dV$$

$$= \frac{\rho}{12} \left(2h_M w_M^4 - (l - d_0) (w_M w_T^3 + w_M^3 w_T) \right)$$

Für die betrachteten Technologie-Demonstratoren aus weichem und hartem Kupfer liegt diese Grenze zwischen $|\dot{\Omega}_z|_{\max} = 259\,170 \frac{\text{U/min}}{\text{s}}$ ($d_W = 50 \mu\text{m}$, Cu weich) und $|\dot{\Omega}_z|_{\max} = 4376\,141 \frac{\text{U/min}}{\text{s}}$ ($d_W = 30 \mu\text{m}$, Cu hart) und damit so hoch, dass dieses Kriterium für Stabilität als vollkommen unkritisch angesehen werden kann.

Die Stoßfestigkeit dieser *UV LIGA* Technologie-Demonstratoren liegt damit zwar unterhalb der in Tabelle 3.2 aufgeführten Vergleichswerte von Silizium-Sensoren, jedoch hoch genug um innerhalb dieser Arbeit stabile Strukturen untersuchen zu können. Lediglich die Biegebelastung im regulären Betrieb kann abhängig von den Abscheideparametern des Kupfers kritisch sein. Hier könnten sich Kaltverfestigungseffekte positiv auswirken, wie man sie von Gold-Zahnrädern kennt, die mit *Röntgen LIGA* gefertigt wurden.

Es ist noch zu beleuchten, welche Auswirkungen die prozesstechnisch verhältnismäßig einfach variierbaren Parameter Masseblock-Höhe h_M und Luftspalt-Dicke d_0 unter Beibehaltung aller anderen Parameter auf die Technologie-Demonstratoren haben. Dazu ist in Abbildung 4.22 a) die Verschiebung der rechten, unteren Außenkante am Masseblock Δz_2 bei einer lateralen Beschleunigung $a_x = 1 \text{ g}$ in Abhängigkeit von h_M dargestellt. Bei $h_M = 800 \mu\text{m}$ liegen die Auslenkungen für alle Typen bei einem Zehntel der Luftspalt-Dicke $|\Delta z_2| = d_0/10 = 0,8 \mu\text{m}$. Eine größere Masseblock-Höhe führt zu einem größeren Betrag der Auslenkung $|\Delta z_2|$, eine kleinere Masseblock-Höhe zu einem kleineren Betrag der Auslenkung. Durch den

Tabelle 4.4: Parameter für das Übertragungsverhalten der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *UV LIGA* für den Messbereich $a_x = \pm 10 \text{ g}$ mit den Parametern nach Tabelle 4.3, der Spaltbreite $w_T = 220 \text{ }\mu\text{m}$ und der Masseblock-Höhe $h_M = 800 \text{ }\mu\text{m}$.

d_W in μm	30	35	40	45	50
w_M in mm	1,123	1,379	1,647	1,927	2,218
B_1 in $\frac{\text{nm}}{\text{g}}$	800	800	800	800	800
$B_1 \cdot B_2$ in $\frac{\text{ff}}{\text{g}}$					
für $a_x = \pm 1 \text{ g}$	67,5	103,1	148,3	204,0	271,1
für $a_x = \pm 5 \text{ g}$	77,6	118,5	170,3	234,1	310,8
für $a_x = \pm 9 \text{ g}$	140,7	213,6	306,1	420,0	557,1
C_0 in pF	1,122	1,768	2,602	3,642	4,904
Rotation					
$\frac{\omega_{\text{rot},0y}}{2\pi}$ in Hz	174,7	155,1	138,9	125,5	114,4
Θ_y in 10^{-12} kg m^2	1,383	2,827	5,366	9,580	16,240
$n_{\text{rot},y}$ in $10^3 \frac{1}{\text{Nm}}$	600	373	245	168	119
$Q_{\text{rot},y,\text{intr}}$	10490	11994	13662	15481	17439
$Q_{\text{rot},y,\text{mol}}(p = 10 \text{ mbar})$	917	1355	1928	2659	3570
$Q_{\text{rot},y,\text{visk}}$	2,421	1,210	0,682	0,419	0,274
Translation					
$\frac{\omega_{0x}}{2\pi}$ in Hz	821,7	908,6	991,6	1071,4	1148,8
m in mg	8,2	12,6	18,2	25,1	33,5
n_x in $10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{N}}$	4,594	2,443	1,417	0,878	0,573
$Q_{x,\text{intr}}$	16492	17660	18687	19607	20445
$Q_{x,\text{mol}}(p = 10 \text{ mbar})$	1358	1881	2486	3175	3946
$Q_{x,\text{visk}}$	119,5	131,3	142,4	152,8	162,6

größeren Masseblock bei größerer Masseblock-Höhe sinkt die Knicksicherheit und umgekehrt steigt sie.

Die Kapazitätsänderungen bei einer lateralen Beschleunigung $a_x = 1\text{ g}$ variieren mit h_M entsprechend dem Betrag der Auslenkung $|\Delta z_2|$, siehe Abbildung 4.22 b). Ebenfalls einen starken Einfluss auf die Kapazitätsänderungen hat die Luftspalt-Dicke d_0 , wie in Abbildung 4.22 c) dargestellt. Durch ein Absenken der Luftspalt-Dicke kann bei steigender Kapazitätsänderung der Arbeitsbereich auf kleinere laterale Beschleunigungen sowie kleinere maximale Biegebelastungen reduziert werden.

Übertragungsfunktion

Die Modellierung des statischen und dynamischen Verhaltens erfolgt wie in den Abschnitten 4.2 und 4.3 dargestellt. Die Ergebnisse sind in Form der Kennwerte für die gesamte Technologie-Demonstratoren-Gruppe *UV LIGA* in Tabelle 4.4 aufgelistet. Der statische Übertragungsfaktor des Primärsensors nach Abbildung 4.4 ist durch die nichtlineare Kennlinie des Übertragungsfaktors B_2 von der lateralen Beschleunigung abhängig. Daher ist der Übertragungsfaktor des Primärsensors in Abhängigkeit der Beschleunigung in Abbildung 4.23 a) dargestellt und einige Faktoren für verschiedene Beschleunigungen sind in Tabelle 4.4 mit aufgelistet.

Das dynamische Verhalten der rotatorischen Bewegung unterscheidet sich von dem in Abbildung 4.11 beschriebenen, da größere Massen zu niedrigeren Resonanzfrequenzen führen und die stärkere viskose Dämpfung der großen Masseblöcke zu geringeren Resonanzgüten führt. Bei zunehmendem Stabdurchmesser sinkt die Resonanzfrequenz der Rotation, während die der Translation steigt. Stellvertretend für die Gruppe der Technologie-Demonstratoren *UV LIGA* ist in Abbildung 4.23 b) und c) das Bode-Diagramm für den Fall eines Stabdurchmessers $d_W = 35\text{ }\mu\text{m}$ dargestellt.

4.5.2 Röntgen LIGA

Wählt man zur Fertigung der Technologie-Demonstratoren die deutlich aufwendigere Technologie der Röntgen-Synchrotron-Lithographie mit anschließender Galvanoformung, lassen sich Stäbe mit wesentlich höheren Aspektverhältnissen und homogenerem Flächenträgheitsmoment entlang der Hauptachse realisieren [644–646]. Bei einer technologisch gegebenen

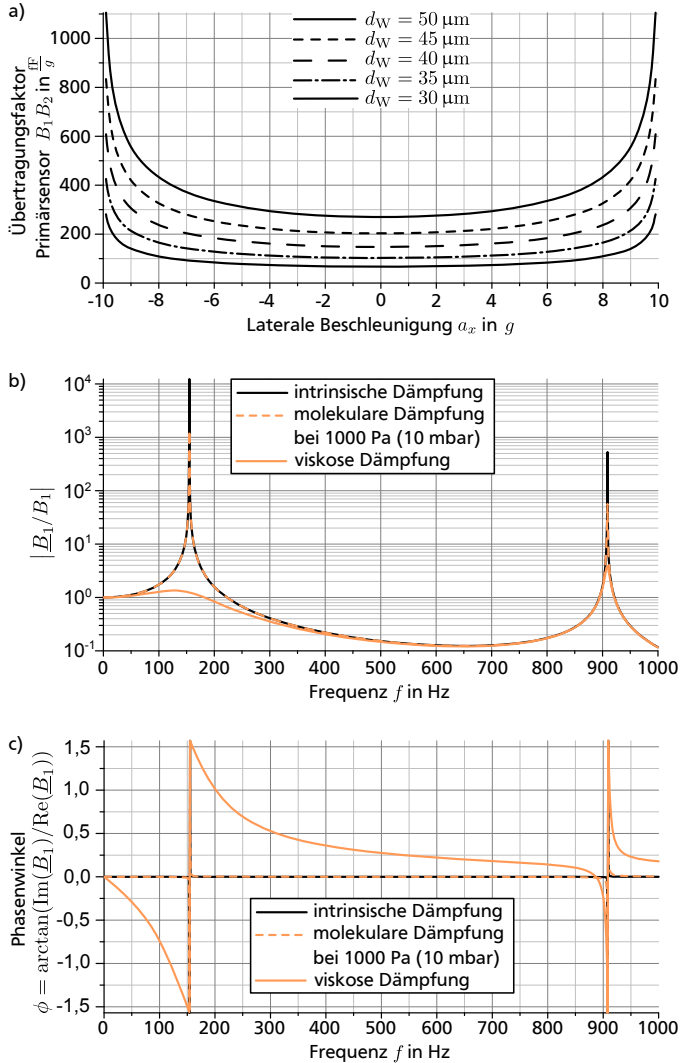


Abbildung 4.23: Eigenschaften der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *UV LIGA* für den Messbereich $a_x = \pm 10 g$ mit den Parametern nach Tabelle 4.3, der Spaltbreite $w_T = 220 \mu m$ und der Masseblock-Höhe $h_M = 800 \mu m$: a) Statischer Übertragungsfaktor des gesamten Primärsensors, b) und c) Berechnetes Bode-Diagramm der Struktur mit dem Stabdurchmesser $d_W = 35 \mu m$.

Stablänge von $l = 100 \mu\text{m}$ können daher Durchmesser im Bereich $d_W = 3 \mu\text{m}$ bis $7 \mu\text{m}$ realisiert werden. Durch die höhere Formkonformität im Vergleich zu *UV LIGA* kann die Knicksicherheit etwas geringer gewählt werden.

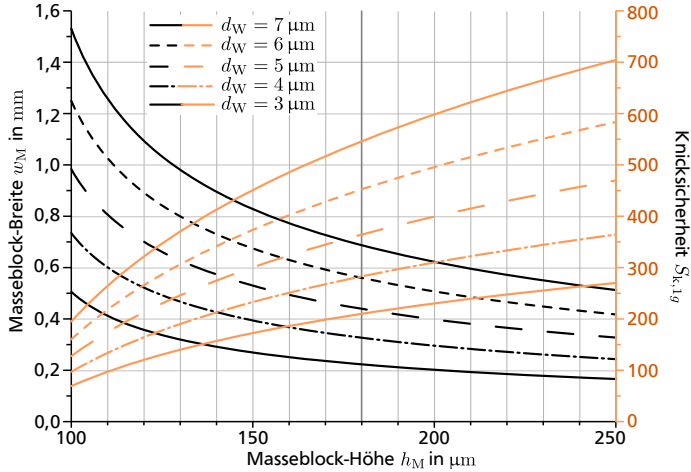


Abbildung 4.24: Auslegung der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *Röntgen LIGA* für den Messbereich $a_x = \pm 10 \text{ g}$ mit den Parametern nach Tabelle 4.3 und der Spaltbreite $w_T = 100 \mu\text{m}$.

Auch für die Gruppe der Technologie-Demonstratoren *Röntgen LIGA* soll die Bedingung $d_0 + \Delta z_2 = 0$ bei lateralen Beschleunigungen von $a_x = \pm 10 \text{ g}$ gelten. In Abbildung 4.24 sind die wesentlichen Zusammenhänge zur Auslegung der Masseblock-Höhe h_M dargestellt: Mit steigendem h_M sinkt die Masseblock-Breite w_M und steigt die Knicksicherheit $S_{k,1g}$. Mit steigendem h_M sinken jedoch auch die Grundkapazität und die Kapazitätsänderung. Die Abwägung der Argumente technologische Realisierbarkeit, Knicksicherheit und Grundkapazität führen zu einem sinnvollen Kompromiss bei einer Masseblock-Höhe von $h_M = 180 \mu\text{m}$. Die Knicksicherheiten für vertikale Fallbeschleunigung liegen dabei im Bereich $S_{k,1g} = 210$ bis 546 , die Masseblock-Breiten im Bereich $w_M = 223 \mu\text{m}$ bis $687 \mu\text{m}$ und die Grundkapazitäten im Bereich $C_0 = 30 \text{ fF}$ bis 447 fF . Damit lassen sich auf dem $60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ großen Belichtungsfeld des Röntgenscanners LIGA1 [645] noch immer mehrere Hundert Strukturen für Messelemente vorsehen.

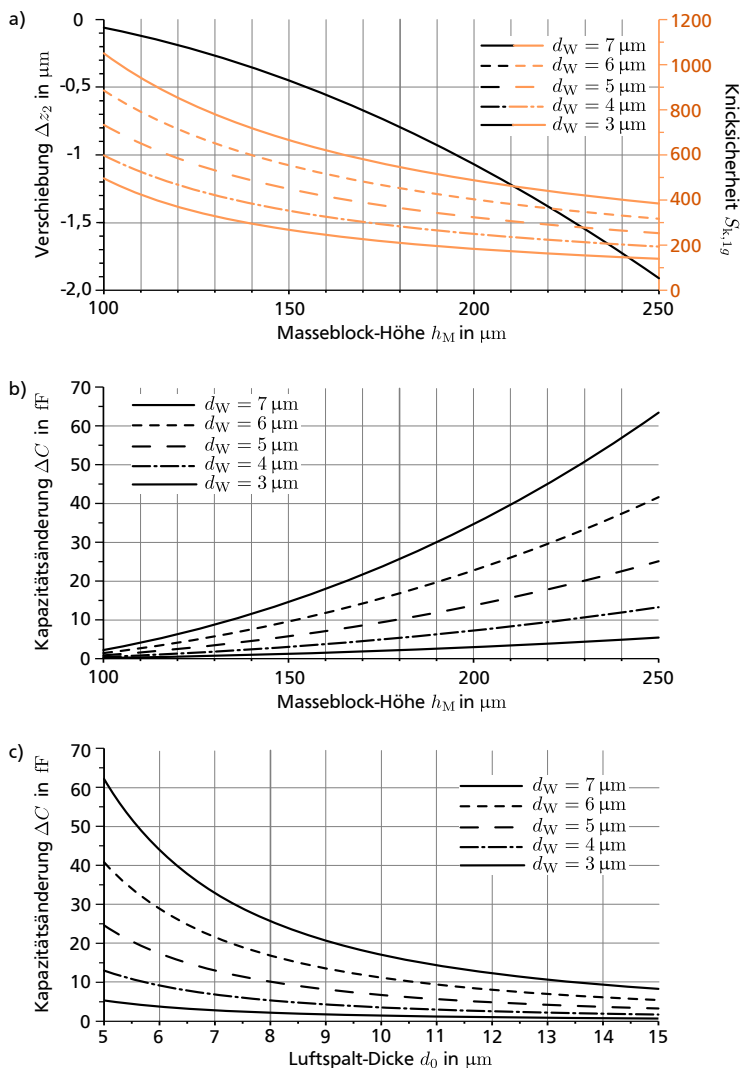


Abbildung 4.25: Einfluss der Parameter h_M und d_0 auf die Technologie-Demonstratoren-Gruppe Röntgen LIGA mit der Masseblock-Höhe $h_M = 180 \mu\text{m}$, den Parametern nach Tabelle 4.3 und der Spaltbreite $w_T = 100 \mu\text{m}$ bei der aktuell wirksamen lateralen Beschleunigung $a_x = 1 \text{ g}$ und der Bedingung $|\Delta z_2| = 0,8 \mu\text{m}$.

Stabilität

Für die Gruppe der *Röntgen LIGA* Technologie-Demonstratoren sind die Kriterien für Stabilität nach Abschnitt 4.1 zu prüfen:

Druckbelastung: Liegt ein Justagefehler vor und soll die Durchbiegung am Ende des Stabs w_l aufgrund von Druckbelastung geringer als der Justagefehler sein, vgl. Abbildung E.9, darf die Beschleunigung in positive z -Richtung den Wert $0,4g \cdot S_{k,1g}$ nicht überschreiten. Dies entspricht Beschleunigungen von $|a_z| = 84g$ ($d_W = 3\mu m$) und $|a_z| = 218g$ ($d_W = 7\mu m$), deren Überschreiten zum Kontakt mit den Gegenelektroden führen kann, jedoch nicht gleichbedeutend mit einem Defekt der Strukturen ist.

Zugbelastung: Da das Aspektverhältnis der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *Röntgen LIGA* wesentlich größer ist als das der Gruppe *UV LIGA*, liegen die Grenzen für die elastische Dehnung deutlich höher, vgl. Abbildung 4.2. Die Beschleunigung in negative z -Richtung darf für Cu (weich) Werte zwischen $|a_z| = 10073g$ ($d_W = 3\mu m$) und $|a_z| = 4810g$ ($d_W = 7\mu m$) nicht überschreiten, für Cu (hart) darf sie Werte zwischen $|a_z| = 50365g$ ($d_W = 3\mu m$) und $|a_z| = 24049g$ ($d_W = 7\mu m$) nicht überschreiten. In diesen Grenzfällen beträgt die elastische Längung lediglich für Cu (weich) $|\Delta z_l| = 42nm$ ($d_W = 3\mu m$) bzw. für Cu (hart) $|\Delta z_l| = 208nm$ ($d_W = 7\mu m$).

Biegebelastung: Aus (4.113) ergibt sich die maximale Verschiebung der linken und rechten, unteren Außenkante am Masseblock für elastisches Biegeverhalten bei Cu (weich) zu $|\Delta z_2| = 1,9\mu m$ ($d_W = 3\mu m$) und $|\Delta z_2| = 2,1\mu m$ ($d_W = 7\mu m$) sowie bei Cu (hart) zu $|\Delta z_2| = 9,4\mu m$ ($d_W = 3\mu m$) und $|\Delta z_2| = 10,5\mu m$ ($d_W = 7\mu m$). Damit tritt bei Cu (hart) auch im Grenzfall $a_x = \pm 10g$ elastisches Verhalten auf, während bei Cu (weich) die Fließgrenze $\sigma_{\text{Fließgr.}}$ überschritten wird. Befindet sich der Masseblock im Kontakt zu den Gegenelektroden (Grenzfall $a_x = \pm 10g$), erfordert das elastische Verhalten Fließgrenzen von $\sigma_{\text{Fließgr.}} > 229MPa$ ($d_W = 3\mu m$) bzw. $\sigma_{\text{Fließgr.}} > 205MPa$ ($d_W = 7\mu m$). Treten noch größere laterale Beschleunigungen auf, wird der Stab nicht weiter gebogen, jedoch durch das Kippen um den Auflagepunkt mit einer Zugbelastung beaufschlagt. Diese Zugbelastung führt selbst bei lateralen Beschleunigungen von $a_x = \pm 500g$ zu verhältnismäßig gering gesteigerten Vergleichsspannungen nach (4.6) von $\sigma_V = 233MPa$ ($d_W = 3\mu m$) und $\sigma_V = 207MPa$ ($d_W = 7\mu m$). Auch

hier bleibt ein Verrutschen der aufliegenden Masseblock-Außenkante auf dem Substrat unberücksichtigt.

Torsionsbelastung: Die maximale Drehbeschleunigung für elastisches Verhalten ergibt sich nach (4.114) zu Werten zwischen $|\dot{\Omega}_z|_{\max} = 347\,906 \frac{\text{U/min}}{\text{s}}$ ($d_W = 7\,\mu\text{m}$, Cu weich) und $|\dot{\Omega}_z|_{\max} = 13\,772\,000 \frac{\text{U/min}}{\text{s}}$ ($d_W = 3\,\mu\text{m}$, hart). Sie stellt damit keine kritische Größe für die Stabilität der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *Röntgen LIGA* dar.

Auch die Stoßfestigkeit der *Röntgen LIGA* Technologie-Demonstratoren liegt unterhalb derer von Silizium-Sensoren nach Tabelle 3.2, jedoch hoch genug für stabile Strukturen innerhalb dieser Arbeit. Nur die Biegebelastung im Grenzfall $a_x = \pm 10\,\text{g}$ ist für Cu (weich) kritisch, wobei Effekte wie Kaltverfestigung oder wie in Abbildung 3.8 dargestellte Effekte an Drähten mit sehr kleinen Durchmessern die Situation entschärfen können.

Behält man alle bisher gefundenen Parameter der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *Röntgen LIGA* für die Masseblock-Höhe $h_M = 180\,\mu\text{m}$ bei und variiert nur die Parameter Masseblock-Höhe h_M bzw. Luftspalt-Dicke d_0 , hat dies Auswirkungen auf den Messbereich, die Verschiebung Δz_2 und die Kapazitätsänderung ΔC . In Abbildung 4.25 sind daher die Parametervariationen unter der Bedingung $a_x = 1\,\text{g}$ in mehreren Teilabbildungen dargestellt:

- a) Bei steigender Masseblock-Höhe ausgehend von $h_M = 180\,\mu\text{m}$ steigt die Verschiebung $|\Delta z_2|$ und sinkt die Knicksicherheit $S_{k,1g}$. Umgekehrt sinkt die Verschiebung und steigt die Knicksicherheit. Eine größere Verschiebung $|\Delta z_2|$ führt zum Anschlagen des Masseblocks bereits bei geringeren Beschleunigungen, also zu einem verringerten Messbereich.
- b) Die durch eine gesteigerte Masseblock-Höhe hervorgerufene größere Verschiebung $|\Delta z_2|$ resultiert in einer größeren Kapazitätsänderung ΔC .
- c) Ebenso führt ein Absenken der Luftspalt-Dicke d_0 zu größeren Kapazitätsänderung ΔC .

Behält man die Masseblock-Breite w_M bei und senkt beispielsweise die Masseblock-Höhe h_M , so sinkt die Verschiebung $|\Delta z_2|$ bei $a_x = 1\,\text{g}$ und die Knicksicherheit steigt (Abbildung 4.25 a). Passt man nun die Luftspalt-Dicke d_0 so an, dass der Masseblock bei $a_x = \pm 10\,\text{g}$ auf den Gegenelektroden aufsetzt, so lässt sich die Kapazitätsänderung steigern (Abbildung 4.25 c),

Tabelle 4.5: Parameter für das Übertragungsverhalten der Technologie-Demonstratoren-Gruppe *Röntgen LIGA* für den Messbereich $a_x = \pm 10\text{ g}$ mit den Parametern nach Tabelle 4.3, der Spaltbreite $w_T = 100\text{ }\mu\text{m}$ und der Masseblock-Höhe $h_M = 180\text{ }\mu\text{m}$.

d_W in μm	3	4	5	6	7
w_M in mm	0,223	0,327	0,439	0,560	0,687
B_1 in $\frac{\text{nm}}{\text{g}}$	800	800	800	800	800
$B_1 \cdot B_2$ in $\frac{\text{fF}}{\text{g}}$					
für $a_x = \pm 1\text{ g}$	2,2	5,4	10,2	16,9	25,7
für $a_x = \pm 5\text{ g}$	2,6	6,2	11,7	19,4	29,5
für $a_x = \pm 9\text{ g}$	5,0	11,5	21,3	35,0	53,0
C_0 in fF	30,4	81,9	164,9	284,8	446,5
Rotation					
$\frac{\omega_{\text{rot},0y}}{2\pi}$ in Hz	221,9	154,7	111,6	82,0	60,3
Θ_y in 10^{-15} kg m^2	0,5	1,9	5,7	14,4	31,8
$n_{\text{rot},y}$ in $10^6 \frac{1}{\text{Nm}}$	1068	559	356	262	219
$Q_{\text{rot},y,\text{intr}}$	2601	3009	3350	3585	3670
$Q_{\text{rot},y,\text{mol}}(p = 10\text{ mbar})$	179	336	543	788	1043
$Q_{\text{rot},y,\text{visk}}$	33,601	6,075	1,885	0,748	0,338
Translation					
$\frac{\omega_{0x}}{2\pi}$ in Hz	737,6	884,4	1020,5	1148,4	1269,8
m in μg	62	145	275	459	705
n_x in $10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{N}}$	753	223	88	42	22
$Q_{x,\text{intr}}$	3921	4655	5212	5668	6059
$Q_{x,\text{mol}}(p = 10\text{ mbar})$	206	397	645	951	1315
$Q_{x,\text{visk}}$	178,4	235,8	284,5	327,3	365,9

während die Biegebelastung in Bezug auf a_x sinkt. Allerdings steht dieser moderaten Verringerung der Biegebelastung eine Änderung der Prozessparameter entgegen, weshalb Nutzen und Aufwand dieser Parametervariation gegeneinander abgewogen werden müssen.

Übertragungsfunktion

Die Parameter für das statische und das dynamische Verhalten der *Röntgen LIGA* Beschleunigungssensor-Technologie-Demonstratoren berechnen sich wie in den Abschnitten 4.2 und 4.3 beschrieben. In Tabelle 4.5 sind diese Kennwerte aufgelistet. Das nichtlineare Verhalten der Primärsensoren $B_1 \cdot B_2$ als Kopplung der beiden Wandlungen von Beschleunigung a_x in Auslenkung ξ und von Auslenkung ξ in Kapazitätsänderung ΔC ist darüber hinaus in Abbildung 4.26 a) für die gesamte Gruppe der Technologie-Demonstratoren dargestellt.

Beispielhaft stellt das berechnete Bode-Diagramm für die Variante mit dem Drahtdurchmesser $d_W = 5 \mu\text{m}$ in den Abbildungen 4.26 b) und c) das dynamische Verhalten für drei verschiedene Gasdrücke dar. Die hohe viskose Dämpfung bei Normaldruck führt zu einer geringen Resonanzüberhöhung, sodass die dynamische Messung den Resonanzfall sowie Frequenzen darüber hinaus mit einschließen kann. Beim Vergleich mit den anderen Varianten fällt auf, dass größere Masseblock-Breiten w_M zu größeren viskosen Dämpfungen führen und gleichzeitig die Frequenzdifferenz zwischen der rotatorischen und der translatorischen Resonanz zunimmt.

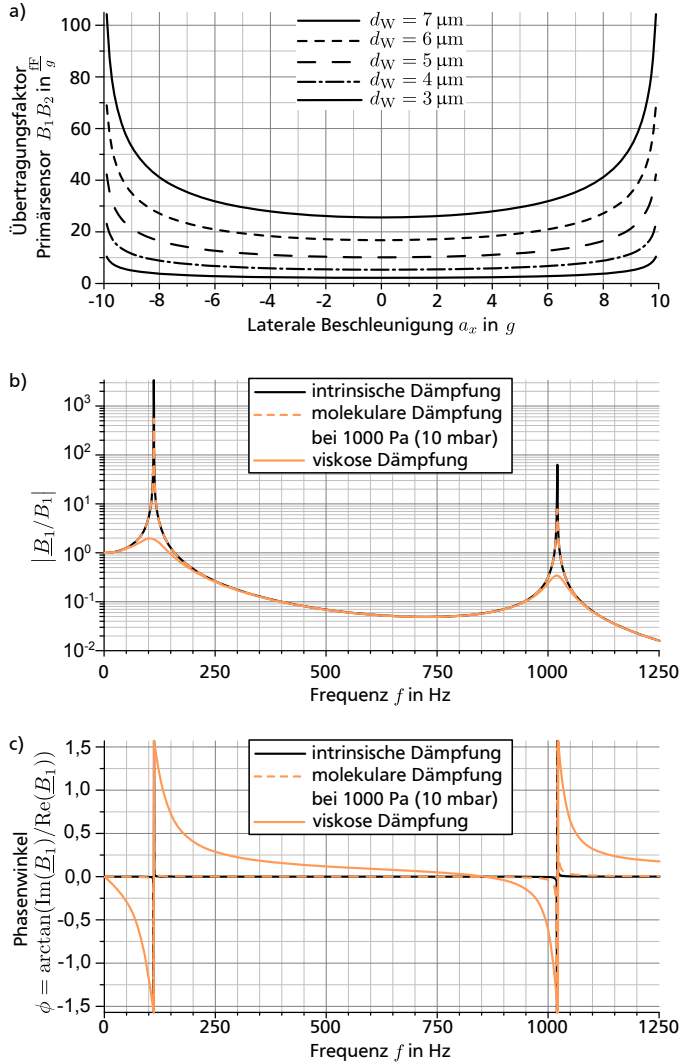


Abbildung 4.26: Eigenschaften der Technologie-Demonstratoren-Gruppe Röntgen LIGA für den Messbereich $a_x = \pm 10 g$ mit den Parametern nach Tabelle 4.3, der Spaltbreite $w_T = 100 \mu\text{m}$ und der Masseblock-Höhe $h_M = 180 \mu\text{m}$: a) Statischer Übertragungsfaktor des gesamten Primärsensors, b) und c) Berechnetes Bode-Diagramm der Struktur mit dem Stabdurchmesser $d_W = 5 \mu\text{m}$.



5 Fertigung des Inertialsensors

Aufbauend auf den in Kapitel 2.2 dargestellten technologischen Grundlagen beschreibt dieses Kapitel die im Rahmen dieser Arbeit experimentell untersuchten Verfahren zur Fertigung der in Kapitel 4 ausgelegten Technologie-Demonstratoren. Dabei sind Multiskalenprobleme zu lösen, denn es treten Schichtdicken im Nanometerbereich sowie laterale und vertikale Abmessungen im 1-stelligen bis 3-stelligen Mikrometerbereich auf, vgl. Abbildung 5.1. Die Fertigung von Strukturen mit so unterschiedlichen Abmessungen in direkter Nachbarschaft verursacht Problemstellungen der Fertigungstechnik wie beispielsweise deren gleichzeitige galvanische Abscheidung, die im Folgenden detailliert ausgeführt sind.

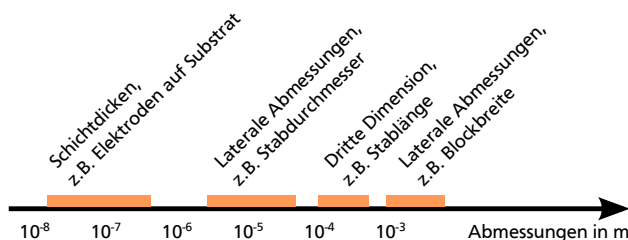


Abbildung 5.1: Skalenübergreifende Strukturdimensionen innerhalb der zu fertigenden Strukturen.

Der folgende kurze Abriss stellt die Prozessschritte vereinfacht und verallgemeinert dar, während die Details der Prozessfolge in den sich anschließenden Unterkapiteln eingehend beschrieben sind. Die Prozessfolge beginnt mit der Fertigung mehrstufig strukturierter galvanischer Startschichten und Galvanoformen, fährt fort mit der galvanischen Abscheidung der metallischen Mikrostrukturen und endet mit dem Aufbau vollständiger Technologie-Demonstratoren mit Auswertelektronik. Wie in Abbildung 5.2 a) dargestellt, ist die Kontaktschicht mit Hilfe von UV-Lithographie und PVD (Physical Vapour Deposition) als 1. Ebene eines mikrostrukturierten metallischen Dünnsfilms zu erzeugen. Sie wird die Kontaktierung der Zentralelektrode über den senkrechten Stab sowie die Ausbildung und Kontaktierung der Gegenelektroden links und rechts des Stabs ermöglichen. Darauf ist eine mikrostrukturierte Opferschicht zu erzeugen, vgl. Abbildung 5.2 b). Das Material dieser

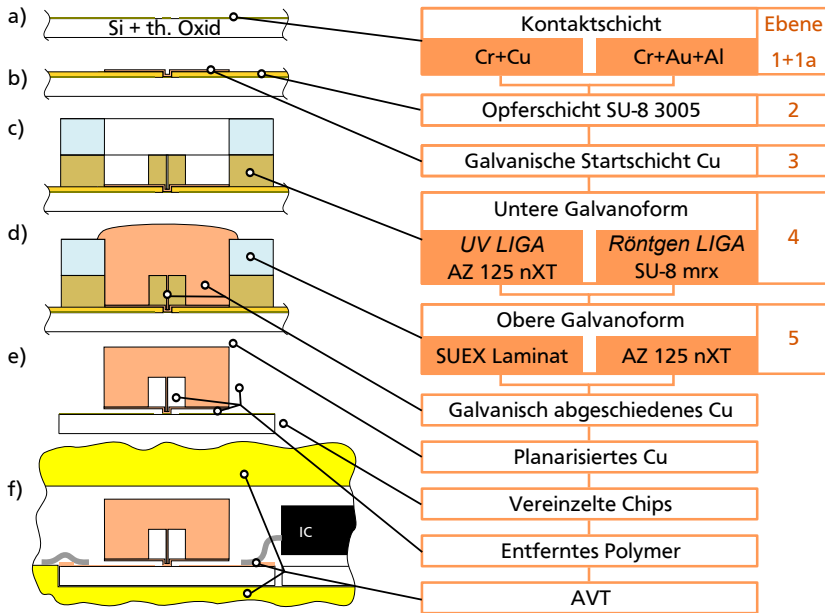


Abbildung 5.2: Prozessablauf-Übersicht zur Inertialsensor-Fertigung [7].

2. Ebene wird zu einem späteren Zeitpunkt der Prozessfolge entfernt, um definierte Luftspalte zwischen dem Masseblock und den beiden Gegenelektroden der ersten Ebene zu erzeugen. In einer 3. Ebene ist mit der galvanischen Startschicht für eine elektrische Kontaktierung der Opferschichtoberseite zu sorgen, um dort galvanisch abscheiden zu können. Weiterhin ist in Ebenen 4 und 5 mit Tiefenlithographie eine mehrstufig strukturierte Galvanoform für die Abscheidung des Stabs sowie des Masseblocks zu erzeugen, vgl. Abbildung 5.2 c). Dabei spaltet sich die Abfolge insbesondere für die *untere Galvanoform* in den Teil *UV LIGA* für Aspektverhältnisse des Stabs von maximal 15 und den Teil *Röntgen LIGA* für Aspektverhältnisse des Stabs von maximal 50 auf. Mit dieser Aufspaltung verbunden sind unterschiedliche technologische Randbedingungen und Chipgrößen, sodass sich alle Ebenen der beiden Stränge *UV LIGA* und *Röntgen LIGA* im Detail unterscheiden. Die galvanische Abformung in Abbildung 5.2 d) dient dazu, das Negativ der Galvanoform als metallische Mikrostruktur abzuformen. Nach dem optionalen Planarisieren ist der gesamte Wafer in Chips zu vereinzelnd und die polymeren Galvanoformen sowie die Opferschicht sind abschließend zu entfernen,

vgl. Abbildung 5.2 e). Die letzten Schritte zum Aufbau eines funktionalen Technologie-Demonstrators lassen sich zusammenfassen mit Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für die mechanische Fixierung des Chips, die elektrische Verbindung mit der Auswerteelektronik sowie die Gehäusung des Gesamtaufbaus, vgl. Abbildung 5.2 f).

5.1 Technologische Gründe für die Gestalt der Mikrostruktur

Dem Leser mag sich bei der Vorstellung des eigenen Ansatzes für Inertialsensorstrukturen in Abbildung 3.10 und der Auslegung der Struktur in Kapitel 4 die Frage gestellt haben, weshalb der Luftspalt zwischen Masseblock und Gegenelektroden nicht auf Höhe des oberen Stabendes gewählt wurde. Für die Stabilität des Biegestabs wäre dies durch die kleinere zu tragende Masse vorteilhaft, allerdings haben die dafür notwendigen Fertigungsverfahren in mehreren Voruntersuchungen [42, 43, 47] aus verschiedenen Gründen nicht zum Erfolg geführt. Diese Gründe sind in Anhang D.1 aufgelistet und fließen als Entscheidungsgrundlage in die folgenden Unterkapitel mit ein.

5.2 Kontaktschicht – Ebenen 1 und 1a

Die Kontaktschicht stellt die unterste Mikrostruktur-Ebene auf dem isolierenden Substrat aus poliertem, einkristallinen Silizium mit 500 nm dickem, thermischen Oxid (SiO_2) dar und bildet so die Basis für die gesamte Schichtfolge. Sie hat daher eine Vielzahl von Aufgaben:

- Sie soll eine elektrische Verbindung zur Zentralelektrode über den Fuß des senkrechten Biegestabs sicherstellen.
- Isoliert zur Zuleitung der Zentralelektrode soll sie die Gegenelektroden auf dem Substrat zur Verfügung stellen.
- Sie soll Kontaktfelder („Kontakt-Pad“ bzw. „Bond-Pad“) für den Anschluss der Zentral- und der Gegenelektroden in der AVT zur Verfügung stellen.
- Sie soll Justagemarken zum Justieren der folgenden Maskenebenen zur Verfügung stellen.

- Sie soll eine elektrische Verbindung zwischen den zurückgesetzten Mikroelektroden nach Abbildung 2.7 a) und den am Waferand auf die Kontaktschicht drückenden Kontaktstiften („Kontaktpins“) der Galvanik-Waferaufnahme herstellen.
- Sie soll Sägemarken zum Vereinzeln der Chips zur Verfügung stellen.

Die Justagemarken der Kontaktschicht sowie die der folgenden Maskenebenen sind in Tabelle 5.1 dargestellt. Im Fall *UV LIGA* befinden sich die Justagemarken links und rechts am Rand des Wafers, sodass laterale Verschiebungen sowie die Verdrehung um die vertikale Achse mit dem UV-Maskenjustierbelichter SÜSS MA 56 M im Mikrotechniklabor des Instituts EMK an der TU Darmstadt kontrolliert werden können. In den Bildern dargestellt sind die Justagemarken am rechten Rand, die der Übersichtlichkeit wegen von innen nach außen nummeriert sind. Um die Maske der Ebene 1 auch nach Änderungen in den folgenden Maskenebenen weiter nutzen zu können, sind mehr Justagemarken vorgesehen als mindestens notwendig. Im Fall *Röntgen LIGA* wird der Großteil der Strukturen mit Hilfe von UV-Lithographie und dem Maskenjustierbelichter SÜSS MA 56 M definiert, weshalb auch hier Justagemarken links und rechts am Rand des Wafers liegen. Lediglich die Bereiche mit sehr hohem Aspektverhältnis werden mit Röntgen-Synchrotron-Strahlung belichtet und müssen daher mit der Maskenjustiereinheit des Röntgen-Synchrotronscanners JENOPTIK am Strahlrohr LIGA1 der Angströmquelle Karlsruhe (ANKA) des Instituts für Mikrostrukturtechnik am Karlsruher Institut für Technologie justiert werden. Dafür sind zusätzliche Justagemarken weiter innen auf dem Wafer notwendig, die ebenfalls mit der Kontaktschicht definiert werden. Dazu sind in Ebene 1 die Justagemarken auf der UV-Belichtungsmaske zur späteren Justage der Röntgen-Maske vorgesehen. In Ebene 3 sind auf der der UV-Belichtungsmaske ins Zentrum der Justagemarken deutende Pfeilspitzen als zusätzlich Hilfsstrukturen definiert, um die eigentlichen Justagemarken durch die Öffnungen der Röntgen-Maske leichter finden zu können. In der Röntgen-Maske der Ebene 4 ist schließlich das Pendant der Justagemarken auf Ebene 1 vorgesehen mit Öffnungen zur lichtmikroskopischen Justage. Details dazu folgen in Abbildung 5.13.

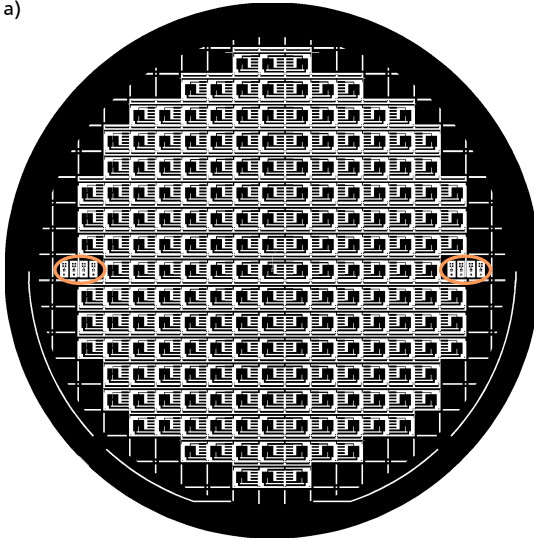
Abbildung 5.3 gibt eine Übersicht über die UV-Belichtungsmasken der Kontaktschicht in den beiden Fällen *UV LIGA* und *Röntgen LIGA*. Die dunklen Bereiche entsprechen den Metallisierungen. Das Bestrahlungsfeld mit Röntgen-Synchrotronstrahlung beträgt 20 mm × 60 mm [645] und bedeckt daher nur einen Teilbereich im Zentrum des 100 mm-Wafers.



Tabelle 5.1: Justagemarken der Prozess-Stränge *UV LIGA* und *Röntgen LIGA*.

Ebene	<i>UV LIGA</i>	<i>Röntgen LIGA</i>	
	Maskenjustierbelichter SÜSS MA 56M	ANKA LIGA1 JENOPTIK-Scanner	
1			
1a			
2			
3			
4			
5			

a)



b)

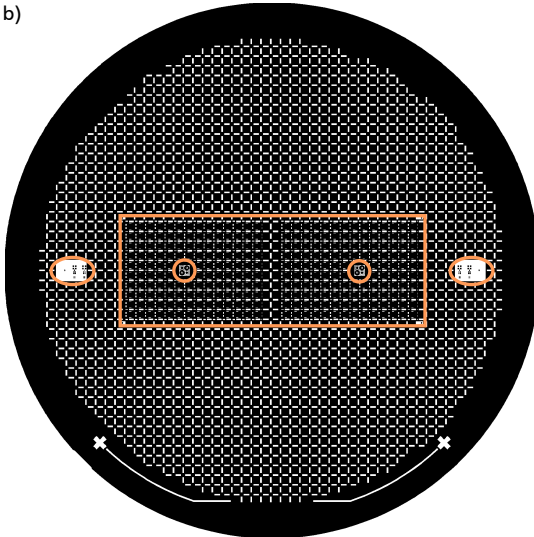


Abbildung 5.3: UV-Belichtungsmasken für die Kontaktschicht in den Fällen a) *UV LIGA* und b) *Röntgen LIGA*. Orang-farbige Markierungen: Justagemarken für SÜSS MA 56M (Ovale links und rechts in a und b), Justagemarken für ANKA LIGA1 JENOPTIK-Scanner (Kreise weiter im Inneren in b), 20 mm × 60 mm-Fenster zur Röntgen-Bestrahlung (Rechteck in b).

Wie in Abbildung 5.2 dargestellt, sind im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Materialsysteme für den Aufbau der Kontaktschicht untersucht worden:

Cr+Cu Eine 20 nm dicke Chromschicht dient als Haftvermittler zwischen dem SiO₂ und einer 300 nm dicken Kupferschicht. Diese Schichtfolge wird aufgrund der überlegenen Haftungseigenschaften und geringen Prozesszeiten mit Hilfe von Magnetronspaltern aufgebracht (Alcatel-Anlage SM 600 mit Vorvakuum-Schleuse, Beschichtung einzelner Wafer in Hauptkammer für 4 Wafer). Diese Schichtabfolge findet in den beiden Prozessablauf-Strängen *UV-LIGA* und *Röntgen LIGA* Berücksichtigung.

Cr+Au+Al Eine 20 nm dicke Chromschicht dient für die folgende 150 nm dicke Goldschicht als Haftvermittler zum Substrat. Die darauf aufgebraute 20 nm dicke Aluminiumschicht dient als Haftvermittler für den darauf strukturierten Photoresist. Diese Schichtfolge wird aufgrund der eingeschränkten Materialauswahl der Sputteranlage mit Widerstands- und Elektronenstrahlverdampfung aufgebracht (Balzers-Anlage BAK 600 zum gleichzeitigen Beschichten von 11 Wafern). Diese Schichtabfolge findet im Prozessablauf-Strang *Röntgen LIGA* Berücksichtigung.

Zur Strukturierung stehen grundsätzlich zwei Verfahren zur Verfügung:

Ätzen Nach der vollflächigen PVD (Aufsputtern oder Aufdampfen) des metallischen Dünnschichtes wird ein Photolack aufgebracht und strukturiert, um anschließend die freigestellten Bereiche der Metallschicht ätzen zu können. Abschließend wird der Photolack wieder entfernt. Dieses Verfahren ist in der Regel vorzuziehen, da es zu größerer Strukturtreue und geringeren Verunreinigungen der Mikrostruktur führt als das Lift-off-Verfahren.

Lift-off Noch vor der PVD wird ein Photolack aufgebracht und strukturiert, vorzugsweise mit Hinterschneidungen, also oben größerer Breite als unten. Dann werden die metallischen Dünnschichten aufgebracht, sodass sie an den photolithographisch freigestellten Bereichen auf dem Substrat haften. Abschließend werden der Photolack und die darauf befindlichen Dünnschichten mit einem Lösungsmittel entfernt. Dieses Verfahren ist vorzuziehen, wenn sich die Dünnschichten nicht ohne Beschädigung der darunter liegenden Schichten vollständig ätzen lassen.

5.2.1 Schichtabfolge Cr+Cu – Ebene 1

Die Strukturierung der Dünnschichtfolge aus 20 nm Chrom und 300 nm Kupfer im Lift-off-Verfahren unter Verwendung der Parameter nach Tabelle 5.2 führt zu sehr guten Ergebnissen, wohingegen im Rahmen dieser Arbeit die Strukturierung durch Ätzen keine zufriedenstellende Ergebnisse zeigt, vgl. Anhang D.2.

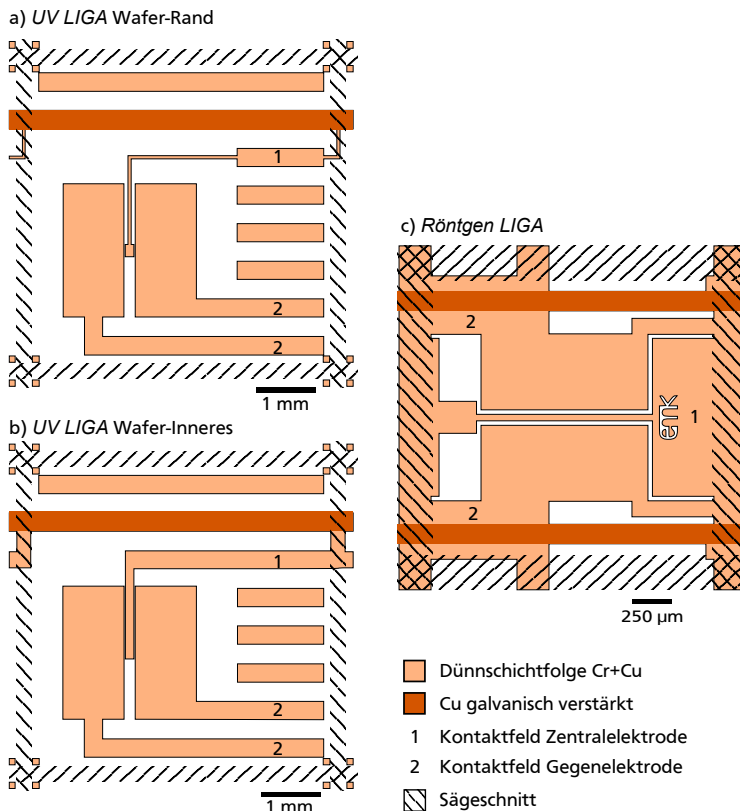


Abbildung 5.4: Ebenen 1 und 1a: Draufsicht auf Kontaktschicht (Cr+Cu), die lokal mit Cu galvanisch verstärkt ist: a) UV LIGA: Struktur am Wafer-Rand, b) UV LIGA: Struktur nahe Wafer-Zentrum, c) Röntgen-LIGA.

Tabelle 5.2: Parameter zur Lift-off-Strukturierung metallischer Dünnschichten (hier Cr+Cu und Cr+Au+Al) auf 100 mm-Wafern mit SiO₂-Oberfläche.

Schritt	Parameter
	Abkürzungen: SC = Spin Coating, SB = Soft Bake, EBR = Edge Bead Removal, Exp = Exposure, Dev = Development, Rem = Removal
Dehydrieren	3 min @ 195°C
Haftvermittler aufbringen (TI-Prime, microchemicals GmbH)	<ul style="list-style-type: none"> • SC: 30 s @ 3000 U/min • SB: 2 min @ 195°C
Lift-off-Photoresist mit Hinterschneidungen strukturieren (Negativresist, AZ nLOF 2070, AZ Electronic Materials USA Corp.)	<p>Lackdicke: 7 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • SC: 60 s @ 3000 U/min • SB: 1 min @ 100°C • EBR: 30 s @ 500 U/min und mr dev 600 am Rand aufsprühen (Propylenglykolmonomethylethylacetat (PGMEA), micro resist technology GmbH) • SB: 7 min @ 100°C • Exp: 450 mJ/cm² @ i-line, gemessen mit Photometer ILT 1400 und Detektor XRL140A, gemittelt über 5 Messpunkte, Dosis auf Waferoberfläche unter Berücksichtigung der Maskentransmission, vgl. Abbildung D.1 • Dev: 2 min AZ 826 MIF (2,38% Tetramethylammoniumhydroxid (TMAH) wässrige Lösung + Additive, AZ Electronic Materials USA Corp.) geschwenkt in Petrischale, nach 1 min Entwickler erneuern
Beschichtung mit Metall durch Physical Vapor Deposition (PVD) <ul style="list-style-type: none"> • Cr+Cu: Magnetron-Sputtern (Alcatel SM 600) • Cr+Au+Al: Widerstands- und Elektronenstrahl-Verdampfen (Balzers BAK 600) 	<ul style="list-style-type: none"> • Cr+Cu: DC, 110 W Vorwärtsleistung, 45 s Ar Sputterätzen, 20 s Cr Vorsputtern, 10 s Cr (20-23 nm) Beschichten, 20 s Cu Vorsputtern, 75 s Cu (300 nm) Beschichten • Cr+Au+Al: Glimmen 120 s bei $5 \cdot 10^{-2}$ mbar Ar mit 200 mA, Beschichtung bei $7 \cdot 10^{-7}$ mbar: 50 s Cr (20 nm) Elektronenstrahltiegel, 390 s Au (78 nm) Widerstandsschiffchen, 50 s Al (20 nm) Elektronenstrahltiegel
Photoresist mit Metallschicht darauf entfernen (AZ nLOF 2070 und Cr+Cu)	<ul style="list-style-type: none"> • Rem: 3-6 min mr dev 600 @ 50°C in Kristallierschale im Ultraschallbecken, anschließend mit Isopropanol spülen, anschließend mit Reinstwasser spülen

Abbildung 5.4 zeigt die Auslegung für die laterale Strukturierung der Kontaktschicht in verschiedenen Fällen. Abbildungen 5.4 a) und b) zeigen zwei Varianten für *UV LIGA*. Im Zentrum befindet sich die Zuleitung zur Zentralelektrode, die mit einem Kontaktfeld am Rand der Struktur (1) für die Kontaktierung mit der Auswerteelektronik verbunden ist. Links und rechts dieser Zuleitung befinden sich die beiden Gegenelektroden, die ebenfalls mit Kontaktfeldern am Rand der Struktur (2) verbunden sind. Oberhalb ist ein horizontal verlaufender Streifen aus galvanisch verstärktem Kupfer dargestellt. Er dient als „Stromschiene“, um einen geringen elektrischen Widerstand zwischen dem durchgängig metallisierten äußeren Rand des Wafers – dem *Kontaktring*, vgl. Abbildung 5.3 – und den Strukturen an verschiedenen Positionen der Waferfläche zu realisieren. Abbildungen 5.4 a) und b) unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Breite der Zuleitung zwischen der Stromschiene, dem Kontaktfeld (1) und dem Ende der Zuleitung im Zentrum der Struktur, dort wo der Stab aus der Ebene heraus wachsen soll. Dies dient der Variation des Widerstands zwischen dem Kontaktring und den galvanischen Startschichten der einzelnen Strukturen.

Abbildung 5.4 c) zeigt die Variante für *Röntgen LIGA* in einem anderen Maßstab. Hier sind die Kontaktfelder für die Zentralelektrode (1) und die Gegenelektroden (2) aus Platzgründen als Bond-Pads zum Drahtbonden oder elektrisch leitfähigem Aufkleben von Kontaktierungsdrähten ausgeführt. In dieser Konfiguration lassen sich zwei horizontal dargestellte, galvanisch verstärkte Stromschienen sowie eine vertikal dargestellte Dünnschicht-Verbindung zu den benachbarten Strukturen realisieren. Dadurch wird der Widerstand zu den galvanischen Startschichten deutlich gesenkt und innerhalb des Bestrahlungsfelds für Röntgen-Synchrotron-Strahlung von 20 mm × 60 mm ist eine Variation der Leiterbahnbreiten nicht notwendig.

Während der Abscheidung sei für den Kontaktring ein homogenes elektrisches Potential angenommen. Will man unter gegebenen Abscheidebedingungen auf die Potentialverteilung auf der gesamten Waferoberfläche schließen, sind die Leitwerte $G_{\text{ges},ij}$ mit i von A bis O und j von 1 bis 17 vom Kontaktring bis zu den Startschicht-Elektroden der einzelnen Strukturen zu berechnen. Damit lässt sich dann unter vereinfachenden Annahmen eine Aussage über die primäre Stromdichteverteilung und damit einen Grund für Unterschiede der Abscheiderate zwischen Wafer-Rand und Wafer-Innerem treffen. Abbildung 5.5 stellt das Widerstandsnetzwerk zur Auslegung der Kontaktschicht für die Variante *UV LIGA* dar. Aufgrund von Symmetriebe-

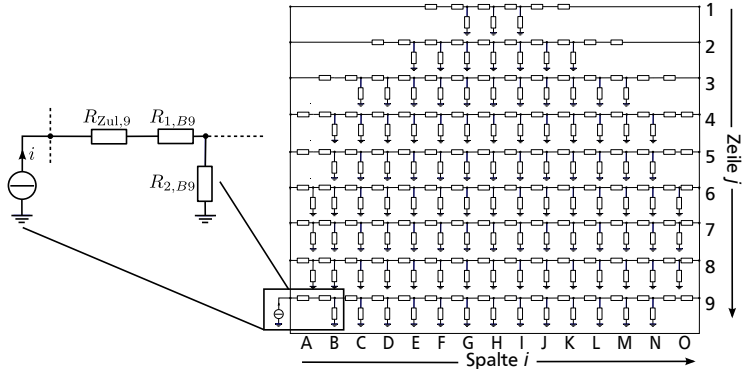


Abbildung 5.5: Widerstandsnetzwerk zur Auslegung der Leiterbahnen in der Kontaktschicht der Variante *UV LIGA* mit Kennzeichnung der Spalten i und Zeilen j . Das Masse-Symbol steht für den elektrischen Kontakt mit dem Elektrolyten.

trachtungen reicht es aus, nur eine Hälfte des Wafers zu untersuchen. Jede Struktur ist repräsentiert durch

$R_{1,ij}$ einen Widerstand des Stromschienenstücks,

$R_{2,ij}$ einen Widerstand der Zuleitung zwischen Stromschiene und Ende der Zuleitung im Zentrum der Struktur

± sowie einen Masseanschluss, der für die Startschicht-Elektrode im elektrischen Kontakt mit dem Elektrolyten steht. Der Spannungsabfall über den Elektrolyten findet in diesem Modell keine Berücksichtigung.

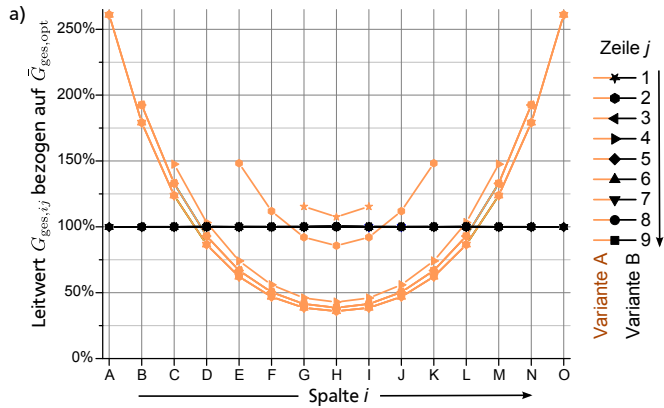
Darüber hinaus ist in vielen Zeilen am linken und rechten Ende jeweils ein weiterer Zuleitungswiderstand $R_{Zul,j}$ zu berücksichtigen. Somit lässt sich der gesamte Zuleitungsleitwert jeder Struktur $G_{ges,ij}$ mit einem Programm zur Simulation elektronischer Schaltungen berechnen [647]. In Abbildung 5.6 sind zwei berechnete Varianten dargestellt, wobei beide die durch $R_{1,ij}$ repräsentierte, auf $4,3\ \mu\text{m}$ Kupferdicke verstärkte Stromschiene voraussetzen. Die durch $R_{2,ij}$ repräsentierten Leiterbahnen bestehen aus $300\ \text{nm}$ dickem Kupfer und variieren in ihren Leiterbahnbreiten zwischen $40\ \mu\text{m}$ und $300\ \mu\text{m}$. Die Variante A setzt für alle Strukturen den technologisch minimal

möglichen Widerstand $R_{2,\min}$ ein. Die Variante *B* verwendet optimiert variierte Widerstände $R_{2,ij}$. Variante *B* ermöglicht eine wesentlich homogenere Leitwertverteilung und damit eine homogenere Verteilung der Abscheideraten. Bei Berücksichtigung der gesamten Elektrolysezelle ist es denkbar, mit diesem Verfahren die generell häufig beobachteten erhöhten Abscheideraten am Wafertrand („Badewannenkurve“) zu kompensieren. Theoretische und praktische Voruntersuchungen zeigen, dass die galvanische Verstärkung der Stromschienenstücke und damit die deutliche Senkung der Widerstände $R_{1,ij}$ der entscheidende Schritt ist, um $G_{\text{ges},ij}$ im notwendigen Bereich variieren zu können und damit diese Optimierung der Abscheideraten erst zu ermöglichen. Daher wird der in Abschnitt 5.2.3 dargestellte technologische Mehraufwand der galvanischen Verstärkung in Kauf genommen.

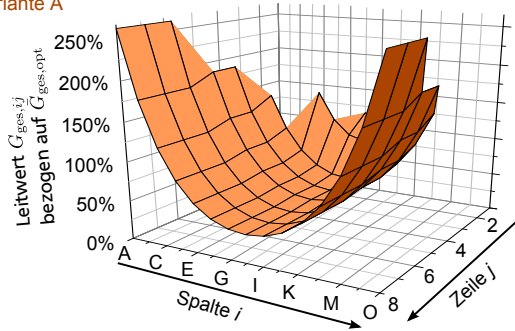
5.2.2 Schichtabfolge Cr+Au+Al – Ebene 1

Die Schichtfolge aus 20 nm Chrom, 150 nm Gold und 20 nm Aluminium bietet den Vorteil hoher chemischer Stabilität der Leiterbahn aus Gold sowie durch die Aluminium-Oberfläche den Vorteil guter Haftung der darauf aufgebrachtten Schichten. So haften beispielsweise Photolacke gut auf dieser metallischen Dünnschichtfolge und sie übersteht die unbestromte Lagerung im schwefelsauren Kupferelektrolyten deutlich länger als die Dünnschichtfolge Chrom-Kupfer aus Abschnitt 5.2.1. Letztere Eigenschaft ist von entscheidender Bedeutung, wenn bei der galvanischen Abscheidung aus dem schwefelsauren Kupferelektrolyten nach Abbildung 5.2 d) die unbestromte Einwirkzeit des Elektrolyten wenige Minuten überschreitet.

Im Rahmen dieser Arbeit führt die Mikrostrukturierung der Schichtabfolge im Lift-off-Verfahren mit Parametern nach Tabelle 5.2 zu guten Ergebnissen. Beim PVD-Schritt Aufdampfen im Vergleich zum Sputtern ist jedoch die Prozesszeit durch das Evakuieren der großen Prozesskammer wesentlich höher, der Materialeinsatz z. B. von Gold ist deutlich ineffizienter und die Haftung der Dünnschichtfolge auf dem Substrat ist schlechter. Beispielsweise hat sich gezeigt, dass die aufgedampfte Dünnschichtfolge nach mehrstündiger galvanischer Abscheidung an der Dichtlippe der Waferaufnahme anhaften und damit bei der Handhabung vom Substrat abgelöst werden kann. Hinzu kommt, dass bei galvanischer Abscheidung von Kupfer auf der Dünnschicht aus Gold durch den Materialübergang von einem mechanisch weniger stabilen Materialübergang ausgegangen werden muss als bei galvanischer Abscheidung von Kupfer auf einer Dünnschicht aus Kupfer.



b) Variante A



c) Variante B

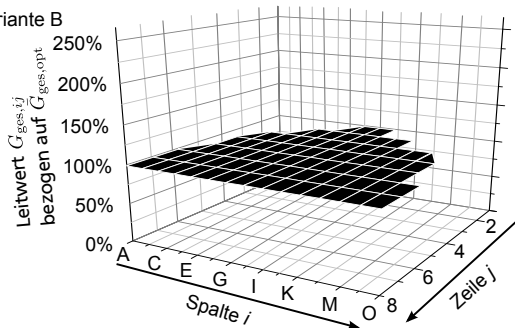


Abbildung 5.6: UV LIGA Leitwerte der Zuleitungen zu den galvanischen Startschichten der einzelnen Strukturen: a) überall minimal möglicher Widerstand $R_{2,min}$ (Variante A) und optimiert variierte Widerstände $R_{2,ij}$ (Variante B), b) überall $R_{2,min}$ (Variante A), c) optimiert $R_{2,ij}$ (Variante B).

Wenn die chemische Stabilität der Kontaktschicht im Vordergrund steht, ist also die Schichtabfolge Cr+Au+Al vorzuziehen, ansonsten wegen mechanischer Eigenschaften des Zielsystems die Schichtabfolge Cr+Cu.

5.2.3 Galvanisches Verstärken der Kontaktschicht – Ebene 1a

Wie in Abbildung 5.4 und der anschließenden Diskussion dargestellt, ist es sinnvoll, die Kontaktschicht lokal galvanisch zu verstärken, um gut leitfähige Verbindungen vom Waferand zur Wafermitte zu führen. Dazu wird der Photoresist AZ 9260 aufgebracht, mit den Justagemarken der Ebene 1a nach Tabelle 5.1 zur Dünnschicht der Kontaktschicht justiert belichtet und entwickelt, um anschließend in Photoresist-Öffnungen Cu galvanisch abzuscheiden. Abschließend wird der Photolack nasschemisch wieder entfernt. Tabelle 5.3 stellt die Prozessparameter für diesen Schritt dar, wobei Abschnitt 5.7 die Apparate und die Eigenschaften des Elektrolyten detailliert beschreibt. Durch eine inhomogene Belegung des Wafers mit galvanisch aktiver Fläche variiert die Abscheiderate, sodass die hier aufgeführten Parameter nur für die hier verwendeten Masken mit den genannten Streifenbreiten gelten.

5.3 Opferschicht – Ebene 2

Die Opferschicht hat die Aufgabe eines Platzhalters für einen Luftspalt. Sie wird auf die Gegenelektroden der Kontaktschicht aufgebracht, um anschließend auf ihrer Oberseite die Masseblock-Elemente der Zentralelektrode abzuscheiden, vgl. Abbildung 5.2 a) bis d). Abschließend wird die Opferschicht entfernt, um anstelle der Opferschicht einen Luftspalt zu erhalten, der die Dicke der Opferschicht aufweist, vgl. Abbildung 5.2 e).

Generell sind für die Opferschicht alle Materialien geeignet, die sich selektiv zu den im System verbleibenden Materialien entfernen lassen. Im Detail sind folgende Punkte zu beachten:

1. Die Oberfläche der Opferschicht muss elektrisch leitend mit der Kontaktschicht verbunden sein, um bei der galvanischen Abscheidung der Masseblock-Elemente nach Abbildung 5.2 d) alle Startschicht-Elektroden elektrisch kontaktieren zu können.

Tabelle 5.3: Parameter zum strukturierten galvanischen Abscheiden von Streifen aus im Mittel 4,3 µm dickem Kupfer.

Schritt	Parameter Abkürzungen: SC = Spin Coating, SB = Soft Bake, Reh = Rehydration, Exp = Exposure, Dev = Development, Rem = Removal
Dehydrieren	1 min @ 195°C
Galvanoform mit geringer Schichthöhe und senkrechten Seidenwänden strukturieren (Positivresist, AZ 9260, AZ Electronic Materials USA Corp.)	<p>Resistdicke: 8 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • SC: 8 s @ 700 U/min, 50 s @ 3500 U/min • SB: 10 min @ 100°C • Reh: min. 20 min @ min. 60% rel. Luftfeuchte • Exp: 380 mJ/cm² @ ghi-line, vgl. Abbildung D.1 • Dev: 90 s @ AZ 400 K 1:3 verdünnt in Reinstwasser (wässrige NaOH-Lösung, AZ Electronic Materials USA Corp.) geschwenkt in Petrischale, nach 45 s Entwickler erneuern, anschließend mit Reinstwasser spülen
<p>Cu-Abscheidung aus saurem Elektrolyten bei 21°C. Katholyt: Cu Everplate 300, Atotech USA Inc, Albany NY:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40 g/l Cu • 80 g/l H₂SO₄ 98% • 50 mg/l Cl⁻ • 3 g/l Fe(II) • 8 ml/l Accelerator 45 • 2 ml/l Suppressor 45 • 5 ml/l Leveler 45 <p>Anolyt: selbst erstellt</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40 g/l Cu • 8 g/l H₂SO₄ 98% • 50 mg/l Cl⁻ • 3 g/l Fe(II) 	<p>Metalldicke: 4,3 µm, Streifenbreite: 300 µm (<i>UV LIGA</i>) bzw. 120 µm (<i>Röntgen LIGA</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>UV LIGA</i> 107 A s = 1,78 A min bei 13,6 cm² aktiver geometrischer Arbeitselektroden-Fläche mit spannungsgeführter Umkehrpulsabscheidung: u_{ref} = -98 mV Ruhepotential der gesättigten Ag/AgCl-Elektrode, 51 ms @ u_{ref} = 90 mV Abscheiden, 2 ms @ u_{ref} = -210 mV Abtragen • <i>Röntgen LIGA</i> 270 A s = 4,50 A min bei 33,8 cm² aktiver geometrischer Arbeitselektroden-Fläche mit stromgeführter Umkehrpulsabscheidung: 51 ms @ 400 mA Abscheiden, 2 ms @ 600 mA Abtragen
Photoresist entfernen (AZ 9260)	<ul style="list-style-type: none"> • Rem: 5 min Aceton geschwenkt in Kristallierschale, anschließend mit Isopropanol spülen, anschließend mit Reinstwasser spülen

-
2. Die Oberflächenrauheit der Opferschicht überträgt sich bei der galvanischen Abformung nach Abbildung 5.2 d) direkt auf die Rauheit auf der Unterseite der Masseblock-Elemente. Eine geringe Oberflächenrauheit ist anzustreben, da ansonsten zwischen Gegen- und Zentralelektrode die Kapazitätsmessung bzw. die maximal mögliche Antriebsspannung für einen elektrostatischen Antrieb negativ beeinflusst werden können.
 3. Die strukturierte Opferschicht muss chemisch und mechanisch stabil genug sein, um alle auf ihr durchgeführten Prozessschritte unbeschadet zu überstehen. Gleichzeitig muss die Haftung der darauf aufgetragenen Materialien gewährleistet sein.
 4. Das abschließende Entfernen der Opferschicht darf die im System verbleibenden Strukturen nicht angreifen und sollte möglichst rückstandsfrei sein, um die Funktionalität des Inertialsensors sicherzustellen.
 5. Prozesstechnisch sollten der Aufwand für die Fertigung und das Beschädigungsrisiko der restlichen Strukturen auf dem Wafer im Rahmen der Möglichkeiten im Mikrotechniklabor des Instituts EMK möglichst gering sein. Dies gilt insbesondere für das Aufbringen, das Strukturieren und das abschließende Entfernen der Opferschicht.

Die letzten beiden Punkte sprechen für ein polymeres Opferschichtmaterial, da sich dieses trockenchemisch beim abschließenden Veraschen aller polymeren Materialien in einem Schritt mit entfernen lässt. Somit bleiben alle funktionalen Schichten des Systems unbeschadet und der prozesstechnische Aufwand erhöht sich durch das Entfernen der Opferschicht nicht. Dafür ist allerdings, wie in Abbildung 5.2 b) bereits dargestellt, eine elektrisch leitfähige galvanische Startschicht strukturiert auf der Oberseite der Opferschicht herzustellen und diese muss elektrisch mit der darunter liegenden Kontaktschicht verbunden sein. Dazu ist jeweils eine Öffnung in der isolierenden Opferschicht vorzusehen, siehe kreisförmige (*UV LIGA*) bzw. ovale (*Röntgen LIGA*) Öffnung im Zentrum der Strukturen in Abbildung 5.7.

Um den prozesstechnischen Aufwand gering zu halten, ist ein einfach mikrostrukturierbares, chemisch resistentes und dauerhaft elastisches Material auszuwählen. Der Photoresist SU-8 3005 (Negativresist, Microchem Inc.) erfüllt diese Anforderungen und kommt daher im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz. Das Experiment zeigt, dass auf der Kontaktschicht mikrostrukturierbare Schichten aus einlagig aufgetragtem SU-8 3005 eine hohe Defektdichte

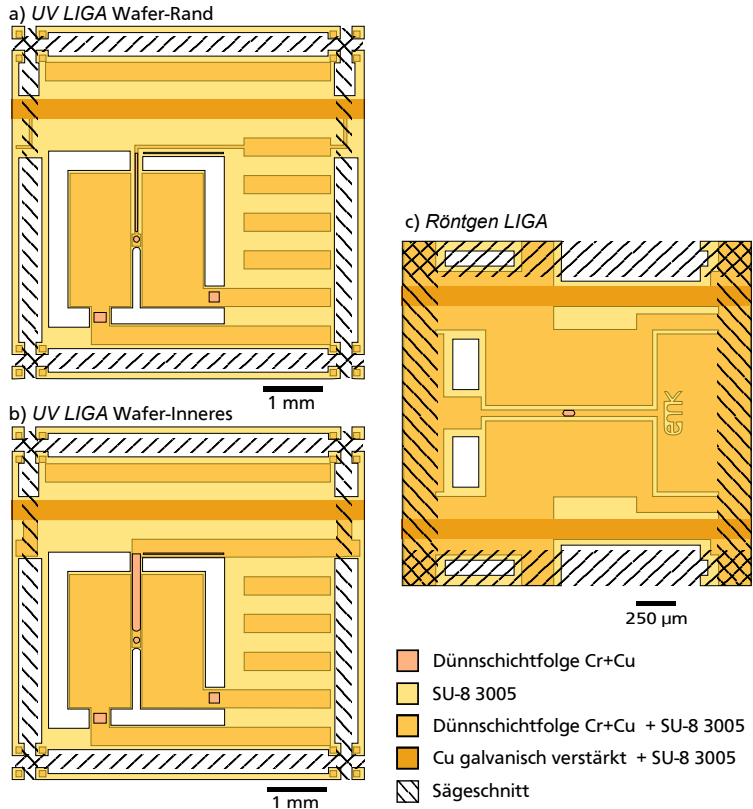


Abbildung 5.7: Ebene 2: Draufsicht auf Opferschicht (SU-8 3005) auf Kontaktschicht (Cr+Cu): a) *UV LIGA*: Struktur am Wafer-Rand, b) *UV LIGA*: Struktur nahe Wafer-Zentrum, c) *Röntgen-LIGA*.

aufweisen. Abhilfe schafft das zweimalige Aufbringen und lithographische Strukturieren der SU-8-Schicht, da sich damit die Wahrscheinlichkeit eines durchgängigen Defekts durch beide Schichten deutlich reduzieren lässt. Tabelle 5.4 gibt dazu die Prozessparameter wieder. Die Justagemarken für diese Belichtungen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Nach Durchführung der Prozesse für diese Arbeit hat sich herausgestellt, dass die Defekte von auskristallisierten Komponenten des Epoxidharz-basierten Photoresists entstehen. Diese Kristalle entstehen bei der Lagerung unter 10°C und lassen sich durch Erhitzen auf über 50°C wieder lösen.

Tabelle 5.4: Parameter zur Strukturierung von zwei Schichten SU-8 3005 auf der nach Tabelle 5.2 strukturierten und nach Tabelle 5.3 verstärkten Kontaktschicht.

Schritt	Parameter Abkürzungen: SC = Spin Coating, SB = Soft Bake, Exp = Exposure, PEB = Post Exposure Bake, Dev = Development, HB = Hard Bake
Oberflächenaktivierung/Descum (R3T muegge STP 2020)	120 s @ 850 W, 1000 sccm O ₂ , 450 mTorr = 0,6 mbar = 60 Pa, 60°C
Dehydrieren	1 min @ 195°C
1. Lage der polymeren Opferschicht strukturieren (Negativresist, SU-8 3005, Microchem Inc.)	Resistdicke: 4 µm <ul style="list-style-type: none"> • SC: 30 s @ 3000 U/min • SB: 6 min @ 100°C, in 5 min auf Raumtemperatur abkühlen lassen • Exp: 400 mJ/cm² @ ghi-line, vgl. Abbildung D.1 • PEB: 9 min @ 100°C, in 5 min auf Raumtemperatur abkühlen lassen • Dev: 5 min @ mr dev 600 (PGMEA, micro resist technology GmbH) geschwenkt in Petrischale, anschließend mit frischem Entwickler spülen, anschließend mit Isopropanol spülen, anschließend mit Reinstwasser spülen • HB: in 120 s auf 120°C, 18 min auf 120°C, in 5 min auf Raumtemperatur abkühlen lassen
Oberflächenaktivierung/Descum (R3T muegge STP 2020)	120 s @ 850 W, 1000 sccm O ₂ , 450 mTorr = 0,6 mbar = 60 Pa, 25°C
2. Lage der polymeren Opferschicht strukturieren (SU-8 3005)	Resistdicke: 4 µm, Parameter wie oben

5.4 Galvanische Startschicht – Ebene 3

Die galvanische Startschicht hat die Aufgabe eine elektrisch leitfähige Oberfläche zur Verfügung zu stellen, auf der das galvanisch abgeschiedene Material haftet. Außerdem soll sie die elektrische Verbindung zu den Zuleitungen der Zentralelektrode in der Kontaktschicht realisieren, wobei die Isolation zu den Gegenelektroden gewahrt bleiben muss.

Für diese Zwecke ist eine metallische Dünnschicht aus Kupfer gut geeignet. Sie lässt sich durch Magnetron-Sputtern im Mikrotechniklabor des Instituts

EMK in guter Qualität und mit geringem Aufwand aufbringen. Da im mechanisch relevanten Bereich auf das Metall der Kontaktschicht gesputtert wird, ist kein Haftvermittler wie etwa Chrom nötig. Somit kommt Ätzen als Strukturierungsverfahren für die metallische Dünnschicht in Frage.

Vorgreifend auf die Aufgaben der unteren Galvanoform – Ebene 4 – sind gute Haftung dieser auf dem Substrat und rückstandsfreie Entwickelbarkeit der Photoresistform zu gewährleisten. Daher soll die galvanische Startschicht aus Kupfer von einer dünnen Schicht aus Aluminium bedeckt werden. In wieweit dies zur Lösung der Aufgaben von Ebene 4 beiträgt, ist in Abschnitt 5.5 beschrieben.

Abbildung 5.8 stellt die Ausgestaltung der galvanischen Startschicht auf der Opferschicht dar, wobei jeweils mit dem Stabdurchmesser d_W variierende Auslegungen nach Abschnitt 4.5 zugrunde liegen. Für *UV LIGA* – Abbildungen 5.8 a) bis c) – sind neben dem Quadrat mit zwei Einschnitten im mittleren Bereich noch weitere Bereiche mit der Dünnschicht bedeckt, um die Haftung der Ebene 4 auf der Ebene 3 zu verbessern. Bei *Röntgen LIGA* – Abbildungen 5.8 d) bis f) – sind bei den kleinsten Strukturen keine Einschnitte vorhanden, da bei diesen Abmessungen keine Notwendigkeit dafür mehr besteht.

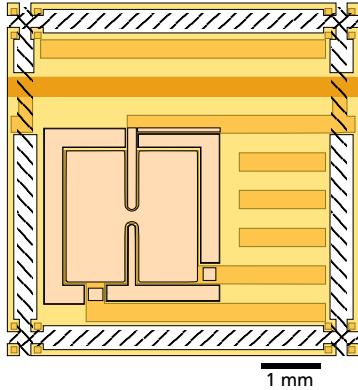
Die elektrische Verbindung von der Kontaktschicht auf die Oberseite der Opferschicht entsteht durch den metallischen Dünnschicht der galvanischen Startschicht, der auch die Kanten des Photoresists im Bereich der runden bzw. ovalen Öffnungen der Opferschicht im Zentrum der Struktur bedeckt. Abbildung 5.8 c) und f) die Situationen in Schnittansicht vergrößert dar. Dieser Teil der im System verbleibenden Dünnschicht verformt sich wie ein Faltenbalg und beeinflusst durch seine Federeigenschaften das mechanische Verhalten der Technologie-Demonstratoren, vgl. Kapitel 6. Alternativ untersuchte Verfahren mit anschließend zu ätzenden Dünnschichten [8] führten durch den Angriff des Stabs durch das Ätzen nicht zum Erfolg.

Für das Aufbringen und das Mikrostrukturieren der galvanischen Startschicht sind in Tabelle 5.5 die Prozessparameter angegeben. Der basische Entwickler für den Photoresist ätzt die dünne Aluminiumschicht auf der Dünnschicht aus Kupfer, sodass anschließend nur noch das Kupfer zu ätzen ist.

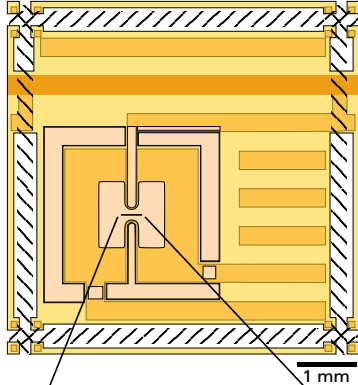
Abbildung 5.9 stellt Fertigungsergebnisse der bis hierher beschriebenen Schichtfolge in schräger Draufsicht dar. In Abbildung 5.9 a) für *UV LIGA* und in Abbildung 5.9 b) für *Röntgen LIGA* erscheinen die Reflexionen vom

UV LIGA

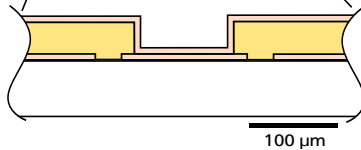
a) Wafer-Inneres: $d_W = 50 \mu\text{m}$



b) Wafer-Inneres: $d_W = 30 \mu\text{m}$

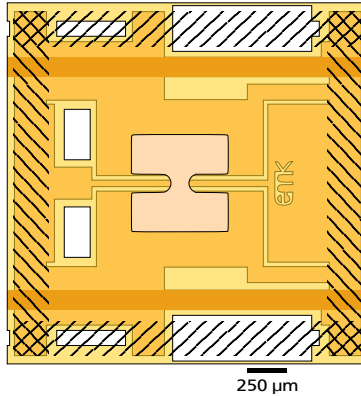


c) Detail von b) im Schnitt, Dicke nicht maßstäblich

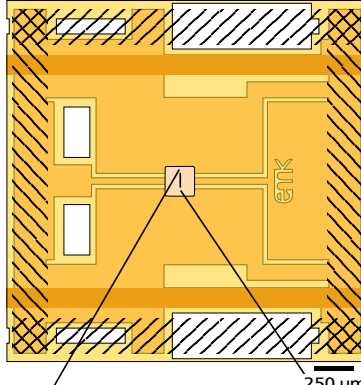


Röntgen LIGA

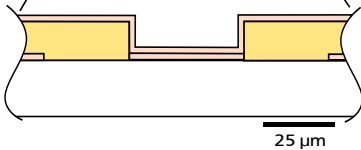
d) $d_W = 7 \mu\text{m}$



e) $d_W = 3 \mu\text{m}$



f) Detail von e) im Schnitt, Dicke nicht maßstäblich



- SU-8 3005
- Dünnschichtfolge Cr+Cu + SU-8 3005
- Dünnschichtfolge Cu+Al
- Cu galvanisch verstärkt + SU-8 3005
- Sägeschnitt

Abbildung 5.8: Ebene 3: Galvanische Startschicht (Cu+Al) auf Opferschicht (SU-8 3005) und Kontaktschicht (Cr+Cu): UV LIGA Draufsichten a) und b), Schnittansicht c); Röntgen LIGA Draufsichten d) und e), Schnittansicht f).

Tabelle 5.5: Parameter zur Strukturierung metallischer Dünnschichten (hier Cu+Al) durch Ätzen auf einer strukturierten Dünnschicht (Tabelle 5.2, Tabelle 5.3), die großteils von SU-8 3005 abgedeckt ist (Tabelle 5.4).

Schritt	Parameter Abkürzungen: SC = Spin Coating, SB = Soft Bake, Reh = Rehydration, Exp = Exposure, Dev = Development, Rem = Removal
Reinigung/Descum (R3T muegge STP 2020)	60 s @ 850 W, 1000 sccm O ₂ , 450 mTorr = 0,6 mbar = 60 Pa, 25°C
Beschichtung mit Metall durch PVD: Magnetron-Sputtern Cu+Al (Alcatel SM 600)	Cu+Al: DC, 110 W Vorwärtsleistung, 45 s Ar Sputterätzen, 20 s Cu Vorsputtern, 75 s Cu (300 nm) Beschichten, 20 s Al Vorsputtern, 20 s Cu (20-30 nm) Beschichten
Ätzmaske strukturieren (Positivresist, AZ 9260, AZ Electronic Materials USA Corp.) und Al ätzen	Resistdicke: 4 µm <ul style="list-style-type: none"> • SC: 8 s @ 700 U/min, 50 s @ 3500 U/min • SB: in 2 min auf 100°C, 12 min @ 100°C, in 5 min auf Raumtemperatur abkühlen lassen • Reh: min. 20 min @ min. 60% rel. Luftfeuchte • Exp: 350 mJ/cm² @ ghi-line, vgl. Abbildung D.1 • Dev: 180 s @ AZ 400 K 2:7 verdünnt in Reinstwasser, nach 90 s Entwickler erneuern, anschließend mit Reinstwasser spülen
Cu Ätzen (Ammoniumperoxodisulfat APDS mit kleinen Mengen Wasserstoffperoxid-Zusatz: 263 g/l Ammoniumpersulfat, 221 ml/l 25%-iges Ammoniak, 779 ml/l Wasser))	<ul style="list-style-type: none"> • auf Sicht ca. 40 s bis 60 s • anschließend mit Reinstwasser spülen
Photoresist entfernen (AZ 9260)	<ul style="list-style-type: none"> • Rem: 5 min Aceton geschwenkt in Kristallierschale, anschließend mit Isopropanol spülen, anschließend mit Reinstwasser spülen

blanken Substrat violett, von der Kontaktschicht hell rötlich, von den Bereichen galvanischer Verstärkung dunkel rötlich, von Opferschicht auf dem Substrat grünlich und von der galvanischen Startschicht silbern.

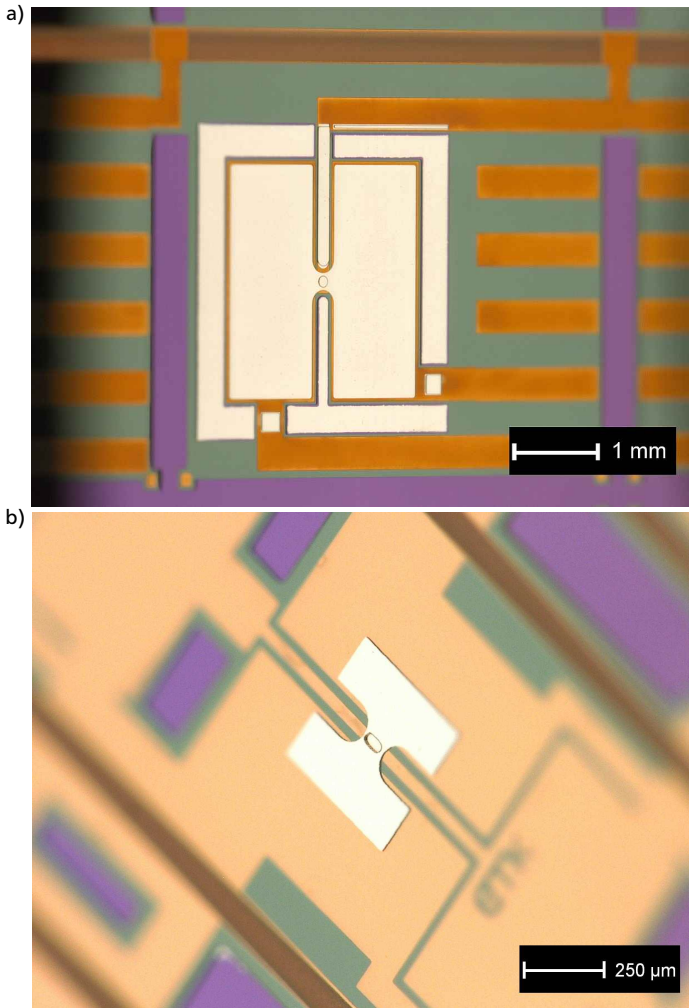


Abbildung 5.9: Beispielhafte Zwischenergebnisse der Fertigung: a) *UV LIGA* mit $d_W = 50 \mu\text{m}$, b) *Röntgen LIGA* mit $d_W = 6 \mu\text{m}$.

5.5 Untere Galvanoform – Ebene 4

Die untere Galvanoform ist für die Form der wichtigsten funktionalen Strukturen verantwortlich. Durch ihre Öffnungen für die Abscheidung der Masenblöcke definiert sie deren jeweilige Größe und Position. Durch ihren vertikalen Kanal bestimmt sie Durchmesser und Länge des Biegestabs. Das Verhältnis von Kanallänge zu Kanaldurchmesser – das Aspektverhältnis AR – entscheidet über das geeignete Lithographie-Verfahren zur Herstellung der unteren Galvanoform: UV-Tiefenlithographie bis $AR=15$ und Synchrotron-Röntgen-Tiefenlithographie bis $AR=50$.

5.5.1 UV LIGA

Technologische Voruntersuchungen zeigen, dass sich für UV-Tiefenlithographie im Mikrotechniklabor des Instituts EMK der Photoresist AZ 125 nXT mit einer Dicke von $400\text{ }\mu\text{m}$ besonders gut eignet [21, 648]. Dieser Negativresist besteht aus einer Acryl-Polymer-Basis und Acryl-Monomeren, die unter UV-Absorption im Bereich zwischen 320 nm und 440 nm vernetzen [649]. Für diese sehr dicken Photoresist-Schichten sind alternativ auch andere Photoresiste wie z. B. SU-8 oder SUEx-Lamine geeignet, die in Anhang D.3 vergleichend dargestellt sind.

Vor allem für Lackdicken größer $100\text{ }\mu\text{m}$ ist eine hohe Transparenz des Photoresists wichtig, um möglichst senkrechte Seitenwände zu erzielen. Als Maß dient die spektrale und spezifische Absorption μ des Photoresists der Dicke d , wobei die einfallende Intensität mit I_0 und die transmittierte Intensität mit I_t bezeichnet seien:

$$\mu = \frac{\lg \frac{I_0}{I_t}}{d} \quad (5.1)$$

Abbildung 5.10 stellt die spezifische Absorption als Messergebnisse (Kurvenscharen A bis C) sowie einen Vergleichswert für SU-8 aus der Literatur (Kurve D) nach [67] dar. Die Absorption des jeweiligen Glaswafers ist über den Wafer sehr homogen und wird bei der Berechnung des Messergebnisses berücksichtigt. Das Messverfahren und die verwendeten Apparate sind in Anhang D.3.1 beschrieben.

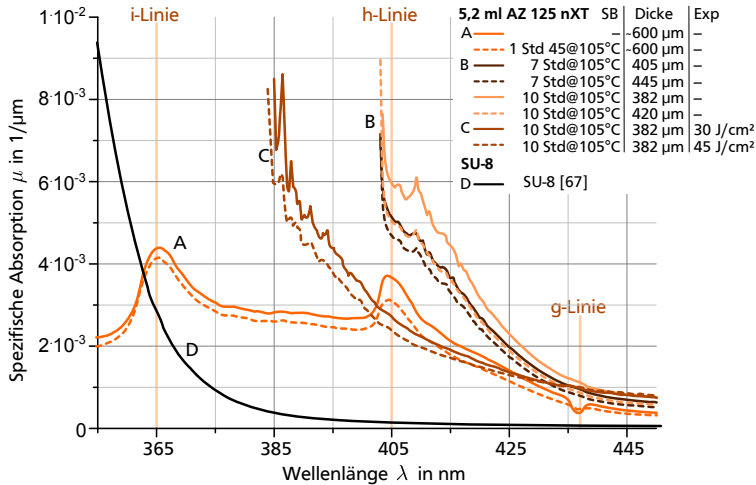


Abbildung 5.10: Spektrale Absorption von 5,2 ml Photoresist AZ 125 nXT, der auf 100 mm-Glaswafern gleichmäßig verteilt wurde [8].

Der nicht oder nur wenig getrocknete Photoresist (Kurvenschar A) zeigt eine verhältnismäßig geringe Absorption im gesamten interessanten Wellenlängenbereich von der i- über die h- bis hin zur g-Linie der Quecksilber-Dampflampe. Die Ausschläge bei den hohen Intensitäten der Lichtquelle (g-, h- und i-Linie) können von Fehlern während der Messung mit dem flüssigen und leicht das Licht streuenden Photoresist herrühren. Der getrocknete, aber noch nicht belichtete Photoresist (Kurvenschar B) zeigt eine relevante Absorption im Bereich der h-Linie und eine geringe Absorption im Bereich der g-Linie. Der vollständig belichtete Photoresist (Kurvenschar C) zeigt eine wesentlich geringere Absorption im Bereich der h-Linie. Die Absorption von SU-8 (Kurve D) ist nochmals deutlich geringer, jedoch unterhalb von 350 nm so hoch, dass man kurzwelligere Strahlung heraus filtert um *T-topping* zu vermeiden. *T-topping* beschreibt breitere Photoresiststrukturen an der Oberfläche im Vergleich zu näher am Substrat liegenden Strukturen [650].

Abbildung 5.11 stellt die laterale Struktur der unteren Galvanoform auf der Schichtfolge der Ebenen 1 bis 3 dar. In Abbildungen 5.11 a) und b) ist die 400 μm dicke Schicht aus AZ 125 nXT grau dargestellt. Dabei sind vernetzte Bereiche dunkler dargestellt als unvernetzte. Die unvernetzten Bereiche

werden im gemeinsamen Entwicklungsschritt mit Ebene 5 entfernt. Im Zentrum wird sich die Öffnung für die Abscheidung des senkrecht stehenden Biegestabs befinden, links und rechts die Öffnungen für die Abscheidung der Blockstrukturen. Die vernetzte Photoresist-Schicht deckt große Bereiche der in Ebene 3 strukturierten Dünnschichtfolge Cu+Al ab. Die rechteckigen und quadratischen Bereiche sind zuvor dort aufgebracht worden, um durch die Aluminium-Oberfläche die Haftung der vernetzten dicken Photoresist-Schicht auf dem Untergrund zu verbessern. Weiterhin hat die 20 nm dicke Aluminium-Beschichtung die Aufgabe durch ihre gesteigerte Reflexion im Vergleich zu reinem Kupfer – im Wellenlängenbereich 360 nm bis 440 nm ca. 80% (Cu + 20 nm Al) im Gegensatz zu ca. 40% (Cu) – für größere Belichtungs-Intensitäten am Boden der Photoresistschicht zu sorgen. Somit homogenisiert sie die Belichtungsintensität über die Schichtdicke und sorgt für nahezu senkrechte Photoresist-Kanten. Hinzu kommt, dass die Aluminium-Oberfläche beim Entwickeln durch den basischen Entwickler geätzt wird. Dadurch werden eventuell am Boden anhaftende Photoresist-Reste wie im Lift-off-Verfahren entfernt. Darüber hinaus verhindert das Aluminium den Kontakt des Photoresists mit Kupfer und damit potentielle chemische Reaktionen, die bei vielen Negativresisten zu Unregelmäßigkeiten am Boden der Photoresist-Schicht führen können [52, 649].

In Tabelle 5.6 sind die Parameter zum Belacken und Belichten der 400 µm dicken Schicht aus AZ 125 nXT dargestellt. Abbildung 5.12 a) stellt eine 400 µm dicke, entwickelte Teststruktur dar, um die Qualität der UV-Tiefenlithographie mit AZ 125 nXT zu verdeutlichen.

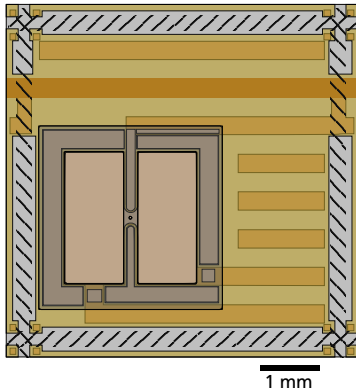
5.5.2 Röntgen LIGA

Die Maskentechnik für die Belichtung mit harter Röntgen-Strahlung ist deutlich aufwendiger als für die Belichtung mit UV-Licht. Anstelle eines Trägers aus Glas kommt eine für Röntgen-Strahlung möglichst transparente Membran zum Einsatz, z. B. aus Ti (2 µm dick), Ni, Si (100 µm dick), Be (500 µm dick), poliertem Kohlenstoff (150 µm dick), transparentem Kohlenstoff (200 µm dick) oder Diamant (30 µm dick) [645]. Als Strahlabsorber reicht eine schwarze Polymerschicht oder eine dünne Chromschicht wie bei der UV-Maskentechnik nicht aus; es sind dickere Mikrostrukturen aus schweren Elementen nötig, z. B. 30 µm dicke Goldstrukturen.

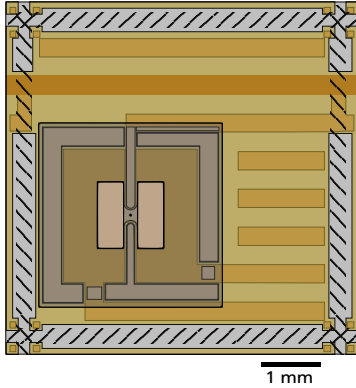
Das Standard-Verfahren nach Abbildung 5.13 a) beginnt mit Elektronenstrahlschreiben für eine hochauflösende UV-Photomaske. Die Strukturen

UV LIGA

a) Wafer-Inneres: $d_W = 50 \mu\text{m}$

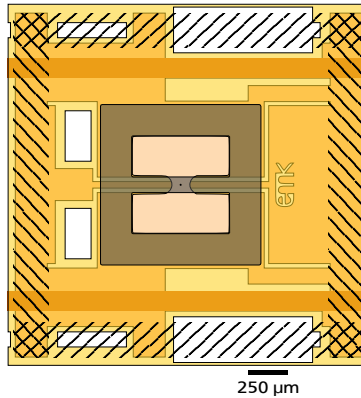


b) Wafer-Inneres: $d_W = 30 \mu\text{m}$

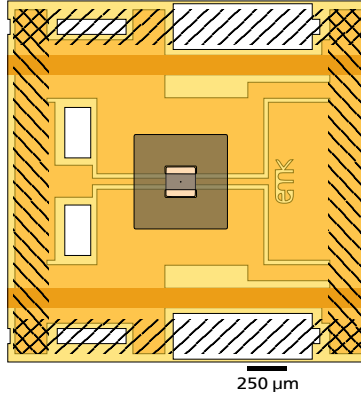


Röntgen LIGA

c) $d_W = 7 \mu\text{m}$



d) $d_W = 3 \mu\text{m}$



- SU-8 3005
- Dünnschichtfolge Cu+Al
- Dünnschichtfolge Cr+Cu bzw. Cu
- Dünnschichtfolge Cr+Cu + SU-8 3005
- Cu galvanisch verstärkt + SU-8 3005
- a) + b): vernetzter/unvernetzter AZ 125 nXT auf darunter liegenden Schichten
- c) + d): SU-8 mrx-50 xp auf darunter liegenden Schichten
- Sägeschnitt

Abbildung 5.11: Ebene 4: Draufsicht auf untere Galvanoform (AZ 125 nXT und SU-8 mrx) auf mehrstufig mikrostrukturiertem Untergrund: UV LIGA Strukturen aus AZ 125 nXT nahe Wafer-Zentrum: a) $d_W = 50 \mu\text{m}$, b) $d_W = 30 \mu\text{m}$, Röntgen LIGA Strukturen aus SU-8 mrx-50 xp: c) $d_W = 7 \mu\text{m}$, d) $d_W = 3 \mu\text{m}$.

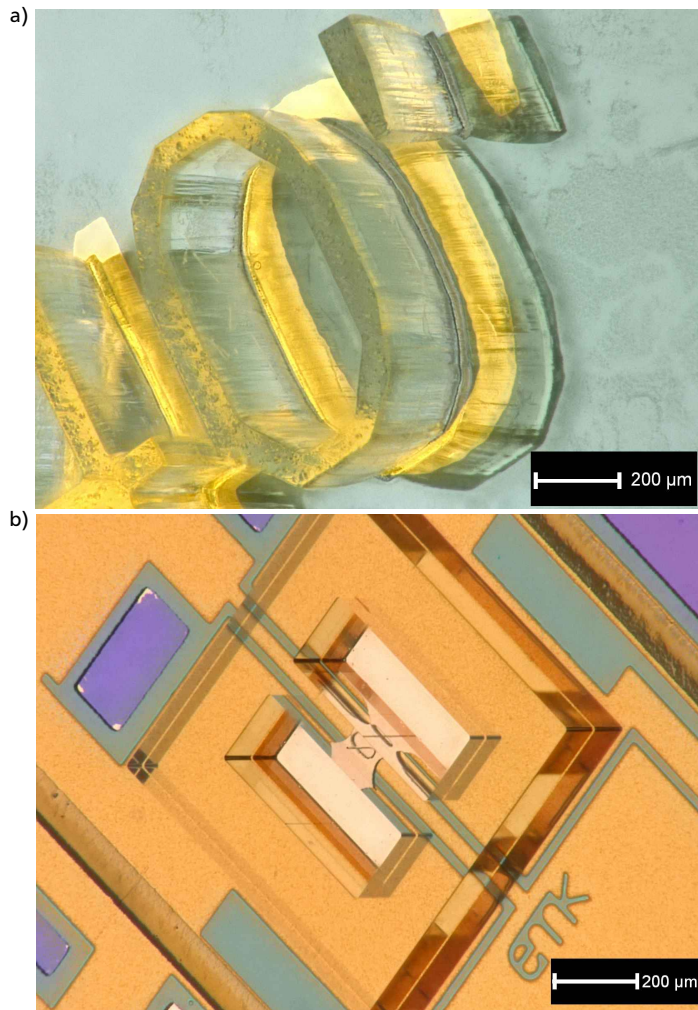


Abbildung 5.12: Beispielhafte Zwischenergebnisse in schräger Draufsicht: a) *UV LIGA* Schriftzug 40' aus 400 μm dickem AZ 125 nXT auf gleichlaufendem Schriftzug aus einer Dünnschicht Gold; b) *Röntgen LIGA* mit $d_w = 6 \mu\text{m}$.

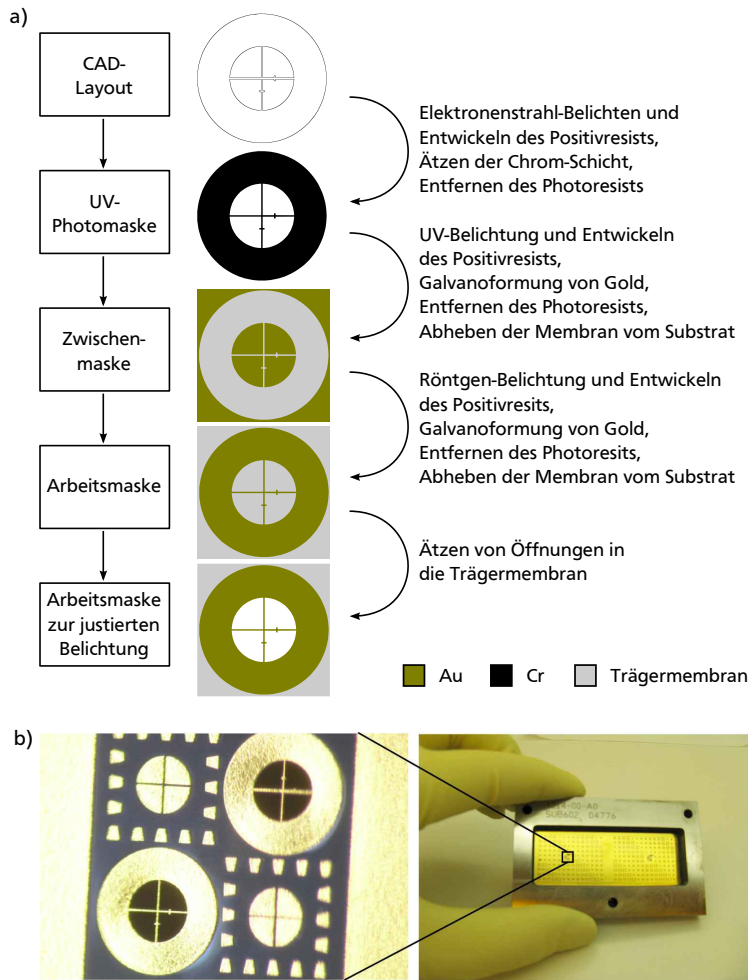


Abbildung 5.13: Arbeitsmaske zur justierten Röntgen-Belichtung, die im Rahmen des BMBF-geförderten KNMF-Projekts MiNiMAL am Karlsruher Institut für Technologie im Institut für Mikrostrukturtechnik für diese Arbeit gefertigt worden ist [13, 24]: a) Fertigungsschritte, b) Realisierte Maske im Trägersrahmen mit 20 mm × 60 mm Bestrahlungsfeld.

Tabelle 5.6: Parameter zum Anlegen einer Struktur in einer 400 µm dicken Schicht aus AZ 125 nXT auf einem mikrostrukturierten Untergrund mit Oberflächen aus Al (Tabelle 5.5), SU-8 3005 (Tabelle 5.4) und Cu (Tabelle 5.2, Tabelle 5.3).

Schritt	Parameter Abkürzungen: SB = Soft Bake, Exp = Exposure, Dev = Development
Material für untere Galvanoform aufbringen und belichten (Negativresist, AZ 125 nXT, AZ Electronic Materials USA Corp.)	Resistdicke: 400 µm <ul style="list-style-type: none"> • Aufgießen und durch langsames Drehen des schräg gehaltenen Wafers manuell bis zum äußersten Wafer-Rand verteilen: 5,9 g • SB: in 15 min auf 105°C abgedeckt mit Petrischale zum Nivellieren der Photoresist-Oberfläche, 13 Std @ 105°C, in 1 Std auf Raumtemperatur abkühlen lassen • Exp: 22 J/cm² @ gh-line, vgl. Abbildung D.1 • Dev: gemeinsam mit oberer Galvanoform, siehe Tabelle 5.8

dieser Maske werden mit Hilfe einer UV-Kontaktbelichtung in einen Photoresist übertragen. Der strukturierte Photoresist dient als Galvanoform für die Abscheidung von 2 µm dicken Mikrostrukturen aus Gold. Nach Galvanoformung, Entfernen des Photoresists und Abtrennen des Trägersubstrats ist somit die erste Maske für Röntgen-Strahlung realisiert. Der Aufwand zur Fertigung dieser Maske ist erheblich und durch die verhältnismäßig dünne Ni-Trägermembran ist sie sehr empfindlich. Daher dient sie nur als Zwischenmaske und ihre Struktur wird durch Röntgen-Lithographie und Galvanoformung in eine Arbeitsmaske zur Belichtung der Ebene 4 überführt. So lässt sich bei Bedarf eine Arbeitsmaske mit vergleichsweise geringem Aufwand herstellen.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt die sehr selten verwendete justierte Röntgen-Belichtung zum Einsatz. Daher müssen zusätzlich an mehreren Stellen Öffnungen in die Trägermembran der Arbeitsmaske geätzt und so Justagekreuze aus Gold freigestellt werden. Dies erlaubt die lichtmikroskopische Überwachung der Ausrichtung von Wafer und Maske mit Hilfe der Justagemarken der Ebene 1 und den freigestellten Justagekreuzen der Maske für Ebene 4, vgl. Tabelle 5.1 und Abbildung 5.13 b).

Das klassische Röntgen LIGA Verfahren basiert auf Polymethylmethacrylat (PMMA), einem Positivresist für harte Röntgen-Strahlung [651]. Dieser

Photoresist benötigt hohe Bestrahlungsdosen und damit lange Belichtungszeiten. Zwei Größenordnungen geringere Dosen benötigt der Negativ-Photoresist SU-8 [645]. Allerdings ist der handelsübliche SU-8 für UV-Belichtung ausgelegt und weist für Röntgen-Belichtung ein sehr schmales und stark schwankendes Prozessfenster auf, das sich kaum beherrschen lässt. Daher ist im Forschungsprojekt INNOLIGA eine neue SU-8-Formulierung untersucht worden [652, 653], die etwa 30fach niedrigere Dosis als PMMA benötigt und sich gerade auf dem Weg zu einem kommerziellen Produkt befindet. Im Rahmen dieser Arbeit kommt die Formulierung SU-8 mrx-50 xp für 100 μm dicke Photoresist-Schichten zum Einsatz und die Prozessierung findet im Rahmen des BMBF-geförderten KNMF-Projekts MiNiMAL durch Mitarbeiter des Karlsruher Instituts für Technologie im Institut für Mikrostrukturtechnik statt.

Abbildung 5.11 stellt die laterale Struktur der unteren Galvanoform auf der Schichtfolge der Ebenen 1 bis 3 dar. In den Abbildung 5.11 a) und d) ist die 100 μm dicke Schicht aus SU-8 mrx-50 xp grau dargestellt. Im Zentrum ist die Öffnung mit hohem Aspektverhältnis für die Abscheidung des Biegestabs, oben und unten sind die Öffnungen zur Abscheidung der Blockstrukturen. Der umgebende Photoresist-Rahmen ist in seiner Breite großzügig ausgelegt, da SU-8 mrx-50 xp Haftungsprobleme auf dem Untergrund aufweist. Der Entwickler ist Lösungsmittel-basiert und greift die Aluminium-Deckschicht der galvanischen Startschicht nicht an.

Zur Röntgen-Belichtung benötigt man ein Strahlrohr an einer Synchrotron-Strahlungsquelle, einen Scanner um den linienförmigen Strahl über die zu belichtende Fläche zu bewegen und einen Computer um die Dosis zu berechnen. Die Belichtung findet am ANKA-Strahlrohr LIGA1 statt, da hier die Energie der Röntgen-Photonen für 100 μm dicke Photoresist-Schichten geeignet ist und eine Maskenjustiereinrichtung vorhanden ist. Tabelle 5.7 gibt die Prozessparameter für die Strukturierung der Ebene 4 im Prozessstrang *Röntgen LIGA* wieder.

Abbildung 5.12 b) stellt Fertigungsergebnisse der bis hierher beschriebenen Schichtfolge in schräger Draufsicht dar. Die Reflexionen von der SiO_2 -Oberfläche des Substrats erscheinen violett, die der Kontaktschicht rötlich und in den Bereichen galvanischer Verstärkung dunkel rötlich, die der Opferschicht auf dem Substrat grünlich und die der galvanischen Startschicht silbern. Zudem erkennt man die Kanten des transparenten SU-8 mrx-50 xp, vor allem im Zentrum den vertikalen Kanal, der im Bereich der ovalen Opferschicht-Öffnung auf der galvanischen Startschicht fußt.

Tabelle 5.7: Parameter zur Strukturierung einer 100 µm dicken Schicht aus SU-8 mrx-50 xp auf einem mikrostrukturierten Untergrund mit Oberflächen aus Al (Tabelle 5.5), SU-8 3005 (Tabelle 5.4) und Cu (Tabelle 5.2, Tabelle 5.3).

Schritt	Parameter
	Abkürzungen: SC = Spin Coating, SB = Soft Bake, Exp = Exposure, Dev = Development
Material für untere Galvanoform aufbringen, belichten und entwickeln (Positivresist, SU-8 mrx-50 xp, micro resist technology GmbH)	<p>Resistdicke: 100 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • SC: 30 s @ 500 U/min und 200 U/min s, 60 s @ 500 U/min und 100 U/min s, 60 s @ 900 U/min und 200 U/min s • SB: in 30 min auf 75°C, 1 Std @ 75°C, in 30 min auf 95°C, 3 Std @ 95°C, in 4 Std auf 25°C • Exp: ANKA-Strahlrohr LIGA1 mit maximaler Intensität im Bereich 4-5 Å Wellenlänge, vgl [645] • Dev: 110 min @ mr dev 600 (PGMEA, micro resist technology GmbH) ohne Badbewegung, 30 min spülen mit Isopropanol

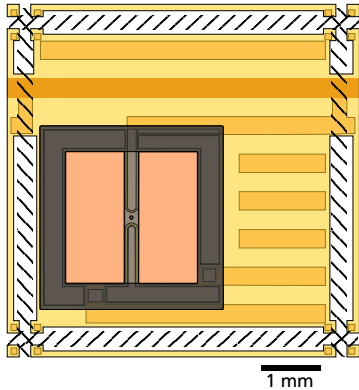
5.6 Obere Galvanoform – Ebene 5

Die obere Galvanoform befindet sich in Abbildung 5.14 auf oberster Ebene und ist dunkelgrau dargestellt. Sie bildet einen Rahmen um die Öffnungen in der unteren Galvanoform. Wird die galvanische Abscheidung über die Höhe der unteren Galvanoform fortgesetzt, dient dieser Rahmen als seitliche Begrenzung der Überwachungen, vgl. Abbildung 5.2 d). Das obere Ende des Biegestabs wird zunächst eine pilzförmige Überwachung ausbilden, bevor sich die Überwachungen der Masseblöcke damit verbinden und in der Schnittansicht eine Art Brücke ausbilden. Gleichzeitig schränkt die obere Galvanoform das Wachstum an den Außenkanten des gesamten Technologie-Demonstrators auf die vertikale Richtung ein.

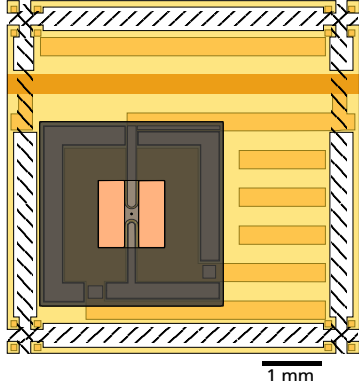
Die obere Galvanoform besteht für beide Prozess-Stränge *UV LIGA* und *Röntgen LIGA* aus dem Negativresist AZ 125 nXT, da dieser nach dem Belichten keinen PEB-Schritt benötigt und somit die mechanische Belastung vor allem der unteren Galvanoform beherrschbar bleibt. Alternativ ist für den Prozess-Strang *Röntgen LIGA* auch der Trockenlaminat-Photoresist SUEx mit einer

UV LIGA

a) Wafer-Inneres: $d_W = 50 \mu\text{m}$

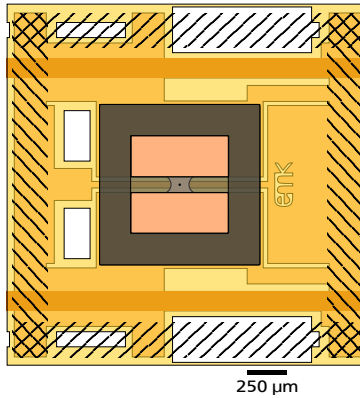


b) Wafer-Inneres: $d_W = 30 \mu\text{m}$

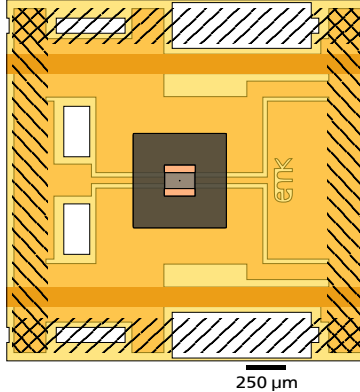


Röntgen LIGA

c) $d_W = 7 \mu\text{m}$



d) $d_W = 3 \mu\text{m}$



- SU-8 3005
- Dünnschichtfolge Cu+Al
- Dünnschichtfolge Cr+Cu bzw. Cu
- Dünnschichtfolge Cr+Cu + SU-8 3005
- Cu galvanisch verstärkt + SU-8 3005
- a) + b): 2 Schichten / 1 Schicht AZ 125 nXT auf darunter liegenden Schichten
- c) + d): SU-8 mrx-50 xp + AZ 125 nXT / SU-8 mrx-50 xp oben auf Sägeschnitt

Abbildung 5.14: Ebene 5: Draufsicht auf obere Galvanoform (AZ 125 nXT) auf mehrstufig mikrostrukturiertem Untergrund: a) $d_W = 50 \mu\text{m}$, b) $d_W = 30 \mu\text{m}$, c) $d_W = 7 \mu\text{m}$, d) $d_W = 3 \mu\text{m}$.

Schichtdicke von 200 μm untersucht worden, allerdings ist die Haftung der unteren Galvanoform auf der Opferschicht vor allem für die hierzu notwendigen Prozessschritte *Auflaminieren* und *PEB* nicht ausreichend [5].

Technologische Voruntersuchungen zeigen, dass sich der Negativresist AZ 125 nXT auch ohne einen Trocknungsschritt photostrukturieren lässt, vgl. Abbildung 5.10. Dazu wird das 100 mm-Substrat zur Belichtung in einen speziellen Halter gelegt, der die Belichtungsmaske auf Abstand zur Lackoberfläche hält und so das Anhaften verhindert. Frisch aufgetragener und vollkommen ungetrockneter Photoresist neigt jedoch dazu, während der Belichtung mit dem Filter *ghi-line* Bläschen zu bilden und *T-topping* auszubilden. Die in Ansätzen untersuchten Vakuum-Trocknungsverfahren für direkt auf das Substrat aufgebrachten flüssigen Photoresist führen bei ca. 400 mbar zu inakzeptabel langen Trocknungszeiten von mehr als einer Woche und bei 0,6 mbar für 8 Std zur photochemischen Inaktivität.

Wird der flüssige Photoresist auf die nach Tabelle 5.6 getrocknete und belichtete Photoresist-Schicht aufgebracht und bei Raumtemperatur und Luftabsaugung für 3 Stunden getrocknet, reduziert sich der Lösungsmittelanteil des oben aufgebrachten Photoresists. Ein Teil des Lösungsmittels – ca. 9% Massenanteil – verdampft, ein anderer Teil diffundiert in den darunter liegenden, unbelichteten Photoresist. Die Belichtung mit dem oben genannten Halter führt nun zu Mikrostrukturen ohne Bläschen und mit vergleichsweise hoher Kantenqualität.

Für den Prozess-Strang *UV LIGA* stellt die obere Hälfte von Tabelle 5.8 die Prozessparameter zur Strukturierung der oberen Galvanoform dar. Die Entwicklung der oberen Galvanoform findet gleichzeitig mit der Entwicklung der unteren Galvanoform statt. Dabei wirkt das in die nicht belichteten Bereiche der unteren Dickschicht AZ 125 nXT eingedrungene Lösungsmittel beschleunigend auf den Entwicklungsvorgang. Beim Erreichen der galvanischen Startschicht ätzt der Entwickler außerdem die dünne Aluminium-Schicht weg und befreit die galvanische Startschicht wie im Lift-off-Verfahren von eventuell anhaftenden Resistresten.

Für den Prozess-Strang *Röntgen LIGA* sind die Zusammenhänge sehr ähnlich und in der unteren Hälfte der Tabelle 5.8 dargestellt. Hier ist ein Temperaturschritt zum Trocknen des Photoresists nötig, der zur Minimierung der mechanischen Spannungen in der unteren Galvanoform mit sehr langsamen Temperaturrampen bei niedriger Temperatur durchgeführt wird und daher sehr lang dauert.

Tabelle 5.8: Parameter zur Strukturierung einer 650 µm bzw. einer 190 µm dicken Schicht aus AZ 125 nXT auf einem mikrostrukturierten Untergrund mit Oberflächen aus AZ 125 nXT (Tabelle 5.6) bzw. SU-8 mrx-50 xp (Tabelle 5.7), Al (Tabelle 5.5), SU-8 3005 (Tabelle 5.4) und Cu (Tabelle 5.2, Tabelle 5.3).

Schritt	Parameter Abkürzungen: Exp = Exposure, Dev = Development
<i>UV LIGA:</i> Material für obere Galvanoform aufbringen, belichten und gemeinsam mit unterer Galvanoform entwickeln (Negativresist, AZ 125 nXT, AZ Electronic Materials USA Corp.)	<p>Resistdicke: 650 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aufgießen und durch langsames Drehen des schräg gehaltenen Wafers manuell soweit verteilen bis alle angelegten Strukturen der unteren Galvanoform bedeckt sind (ca. 80 mm Durchmesser): 4,0 g • Ausnivellieren auf belüfteter Hotplate bei Raumtemperatur • Exp: 19 J/cm² @ gh-line, vgl. Abbildung D.1 • Dev: obere + untere Galvanoform <ul style="list-style-type: none"> – 30 min @ AZ 326 MIF (2,38%ige wässrige Tetramethylammoniumhydroxid-Lösung (TMAH), AZ Electronic Materials USA Corp.) geschwenkt in Kunststoff-Petrischale, alle 9 min Entwickler erneuern – 40 min @ AZ 326 MIF mit Unterstützung durch von durch das Substrat hindurch eingekoppelte Megashall-Wellen (SONOSYS, 1 MHz, 75 W, 20°C) – 5 min @ AZ 326 MIF geschwenkt in Kunststoff-Petrischale
<i>Röntgen LIGA:</i> Obere Galvanoform strukturieren (Negativresist, AZ 125 nXT, AZ Electronic Materials USA Corp.)	<p>Resistdicke: 190 µm</p> <ul style="list-style-type: none"> • SC: 3 s @ 1000 U/min und 500 U/min s, 5 s @ 500 U/min und 500 U/min s • SB: in 60 min auf 55°C, 80 Std @ 55°C, in 60 min auf 25°C • Exp: 11 J/cm² @ gh-line, vgl. Abbildung D.1 • Dev: <ul style="list-style-type: none"> – 27 min @ AZ 326 MIF (2,38%ige wässrige Tetramethylammoniumhydroxid-Lösung (TMAH), AZ Electronic Materials USA Corp.) geschwenkt in Kunststoff-Petrischale, alle 9 min Entwickler erneuern – 10 min @ AZ 326 MIF geschwenkt in Kunststoff-Petrischale, alle 5 min Entwickler erneuern

Der wässrige Entwickler bietet den Vorteil, die anschließende galvanische Abscheidung *nass-in-nass* in permanent wässriger Umgebung starten zu können. Dies reduziert mechanische Schichtspannungen, die entstehen könnten, wenn der sehr dicke, wässrig entwickelte Photoresist trocknet. Außerdem sind die vertikalen Kanäle zur Abscheidung der Biegestäbe bereits wässrig benetzt, sodass kein Benetzungsproblem für die Sacklöcher entsteht.

Da die Prozessierung von Wafern bis zum hier beschriebenen Stadium sehr aufwendig ist, wurde für den Prozess-Strang *UV LIGA* zumeist auf Mikroskopaufnahmen von getrockneten Strukturen verzichtet. Abbildung 5.15 a) zeigt daher nur eine Vorgängerversion der Schichtabfolge *UV LIGA*, wobei die Kontaktschicht der Ebene 1 aus Gold besteht, die Ebene 1a noch nicht existiert und die obere Galvanoform der Ebene 5 noch nicht optimiert getrocknet ist. Im Prozess-Strang *Röntgen LIGA* ist das Trocknen weniger kritisch, sodass die Mikroskopaufnahme in Abbildung 5.15 b) die bis hierher beschriebene Schichtfolge darstellt.

5.7 Galvanisch abgeschiedenes Cu

Dieser Abschnitt beschreibt die Abscheidung und damit die eigentliche Herstellung der in Kapitel 4 ausgelegten metallischen Technologie-Demonstratoren. Die in diesem Fertigungsschritt angewandten Parameter entscheiden wesentlich über die vom Material bestimmten mechanischen Eigenschaften des metallischen Biegestabs. Aufbauend auf den in den Abschnitten 2.2.3 und Anhang C beschriebenen Grundlagen der galvanischen Abscheidung geht es hier um die Überführung der Galvanoform nach Abbildungen 5.2 c), 5.14 und 5.15 in eine galvanisch abgeformte Mikrostruktur nach Abbildung 5.2 d).

Das abgeschiedene Metall soll spannungsarm und entweder sehr feinkristallin oder im Bereich des Biegestabs monokristallin sein. So soll verhindert werden, dass einzelne Korngrenzen durch den gesamten Querschnitt des Biegestabs verlaufen und somit Schwachstellen im beanspruchtesten Teil des Technologie-Demonstrators darstellen. Monokristalline Abscheidung kann mit geeigneten Elektrolyten, geringer Stromdichte und einer Badtemperatur deutlich höher als Raumtemperatur gelingen, z. B. für Gold aus cyanidischen Elektrolyten [152]. Voruntersuchungen mit selbst erstellten, sauren, additiv-freien Kupfer-Elektrolyten bei unterschiedlichen Temperaturen

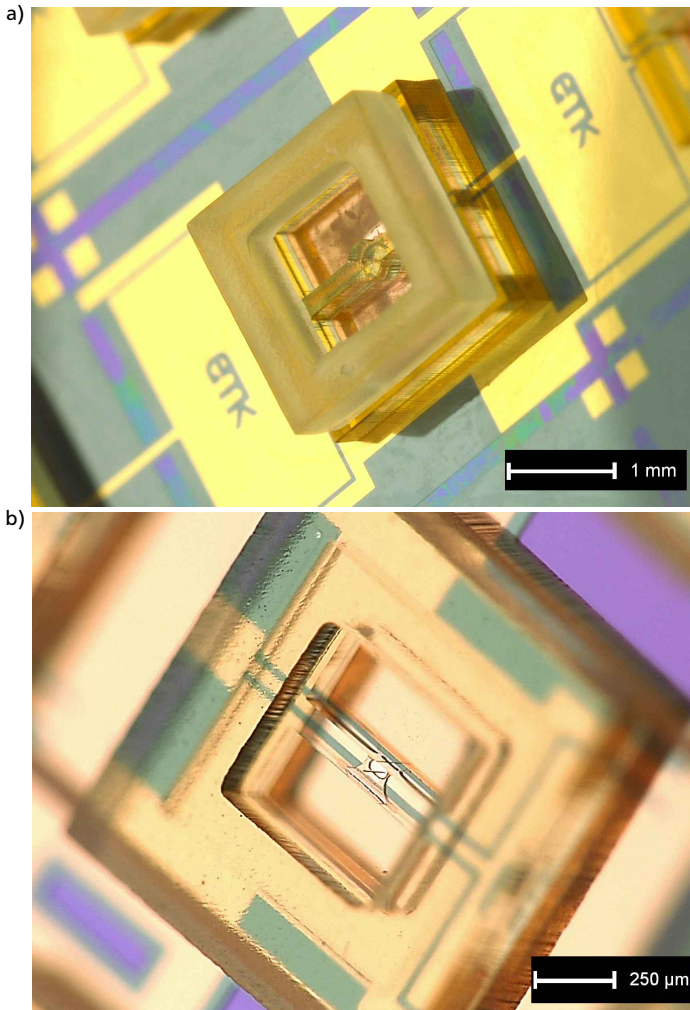


Abbildung 5.15: Beispielhafte Zwischenergebnisse der Fertigung in schräger Draufsicht: a) Vorgängerversion der Schichtabfolge UV LIGA mit $d_W = 40 \mu\text{m}$, b) Röntgen LIGA mit $d_W = 7 \mu\text{m}$.

führen zu unerwünscht großen Kristallen. Weitere Voruntersuchungen mit dem Elektrolyten Atotech *Everplate Cu 300* bei Raumtemperatur und unterschiedlichen Additiv-Konzentrationen zeigen bessere Ergebnisse. Mit den in Tabelle 5.3 dargestellten Parametern lässt sich grundsätzlich feinkristallines, spannungsarmes und duktiles Cu in Galvanoformen ähnlich denen in Abbildung 5.2 c) abscheiden.

Die superkonforme Metallabscheidung unter Verwendung von Additiven in Abbildung C.3 zeigt eine höhere Abscheiderate, je weiter die galvanische Startschicht von der Diffusions-Grenzschicht entfernt ist. Dies deckt sich mit der experimentellen Beobachtung, dass sich die vertikalen Kanäle für die Abscheidung der Biegestäbe mit Elektrolyten ähnlich Tabelle 5.3 zuverlässig füllen lassen, während bei den Blockstrukturen Probleme auftreten können. Voruntersuchungen zeigen, dass die Additivwirkung stark von der Anströmung abhängt. Bei der Abscheidung der Struktur in Abbildung 5.16 ist der Elektrolyt in der Darstellung von unten links nach oben rechts geströmt und die Konzentration des Einebners war zu hoch gewählt. Daher ist die Abscheidungshöhe sehr inhomogen mit einer Überwachsung in Flussrichtung. In der Abbildung ist darüber hinaus in Ergänzung zu Ebene 5 die Qualität der optimiert prozessierten oberen Galvanoform zu erkennen, die nun gut auf der unteren Galvanoform haftet sowie keine Bläschen und kein *T-topping* mehr aufweist.

Eine inhomogene Anströmung kann problematisch sein, sodass der Verzicht auf eine Anströmung durch eine Pumpe, wie sie in Abbildung 2.11 b) noch dargestellt ist, betrachtet werden kann. Verwendet man die dort dargestellte Anordnung ohne Pumpe und mit unten liegender Arbeitselektrode, spricht man von gravitations-gestützter Abscheidung [301]. Wird an der Arbeitselektrode Metall aus dem Elektrolyten abgeschieden, sinkt die lokale Dichte des Elektrolyten und er steigt auf. So können sich gemäß Modell [301] Wirbel ausbilden, die sich wie im Bénard-Experiment selbst organisieren. Steht der Gravitationsvektor senkrecht auf der unten liegenden Arbeitselektrode, ergibt sich bei planaren Oberflächen prinzipiell keine laterale Vorzugsrichtung der Konvektion wie sie bei erzwungener Konvektion leicht auftreten kann. Es sind also grundsätzlich gleichmäßige Abscheideergebnisse bei geringem apparativen Aufwand möglich.

In Abbildung 5.17 a) ist das Schema einer einfachen apparativen Lösung für die gravitationsgestützte Abscheidung mit einem geringen Elektrolytvolumen dargestellt. Die Anreicherung des Elektrolyten geschieht durch Phosphordepolarisierte Kupfer-Clippings, die hinter der inerten Gegenelektrode im

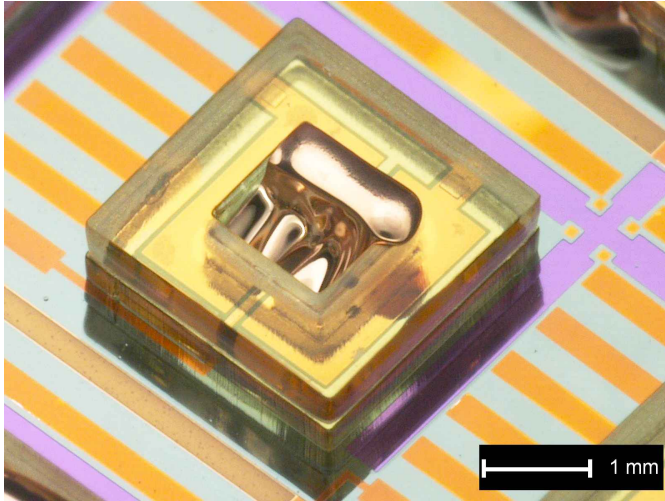


Abbildung 5.16: Ergebnis der Voruntersuchungen zur Abscheidung der metallischen Technologie-Demonstratoren in eine UV LIGA-Galvanoform nach Abbildung 5.2 c) mit $d_w = 35 \mu\text{m}$; Elektrolyt nach Tabelle 5.3, jedoch 10 ml/l Accelerator 45, 3 ml/l Suppressor 45, 7,5 ml/l Leveler 45.

Anolyt-Raum eingeschlossen sind. Abbildung 5.17 b) und c) zeigt die selbst aufgebaute Elektrolysezelle, deren Basis aus einem Waferhalter *trio clip* der silicet AG (Lohfelden) besteht. Sie ist stehend abgebildet, kommt jedoch mit unten liegendem Wafer zum Einsatz. Abbildung 5.17 b) zeigt die geschlossene Zelle mit Sicht durch die Abdeckung des Anolyt-Raums auf Cu-Clippings und die dahinter liegende Gegenelektrode aus Streckmetall mit einer geometrisch aktiven Fläche von ca. 80 cm^2 . Abbildung 5.17 c) zeigt die geöffnete Zelle mit schwarzer Dichtlippe und darin integrierten Kontaktelementen, gesättigter Ag/AgCl-Referenzelektrode im Glaskörper, Ionenmembran Nafion N324 mit einer offenen Fläche von 72 cm^2 und 4 mm-Federstecker-Buchsen zum Anschluss an die Ausgänge des Potentiostaten KP 07 von Bank Elektronik, Pohlheim (schwarz=Arbeitselektrode mit der Kennzeichnung φ_A und mit dem schwarzen Anschluss des Potentiostaten zu verbinden, Glaskörper=Referenzelektrode mit der Kennzeichnung φ_{ref} und mit dem grünen Anschluss des Potentiostaten zu verbinden, rot=Gegenelektrode mit

der Kennzeichnung φ_G und mit dem gelben Anschluss des Potentiostaten zu verbinden).

Die *Nernst-Planck-Gleichung* (2.2) beschreibt den Grenzstrom in Abhängigkeit der Transportphänomene Migration, Diffusion und Konvektion, wobei für den hier verwendeten Elektrolyten durch den hohen Leitsalzanteil die Migration vernachlässigt werden kann. In sehr schmalen Bereichen der Galvanoformen ist die lineare Diffusion das vorherrschende Transportphänomen, vgl. (2.8). In breiteren Galvanoformen bzw. auf Flächen herrscht die planare Diffusion vor, vgl. (2.9). Durch die Ausbildung von Wirbeln bei der gravitationsgestützten Abscheidung, kann für die breiten Galvanoformen bzw. auf Flächen auch konvektiver Stofftransport entscheidend sein.

Um beispielhaft den im Fall *Röntgen LIGA* bei der Fertigung der Inertialsensor-Technologie-Demonstratoren anwendbaren Grenzstrom sowie die vorliegende Durchtrittshemmung mit dem theoretischen Wert nach Tabelle C.2 zu vergleichen, sind in Anhang C.2.6 mehrere Stromdichte-Potentialkurven aufgeführt und diskutiert. Die anwendbare Grenzstromdichte ohne Wasserstoffabscheidung an der Arbeitselektrode liegt bei $j_{\text{lim}} \approx 80 \text{ mA/cm}^2$. Die aus den Kurven ermittelte Austauschstromdichte von $j_0 = 1,243^{+0,076}_{-0,101} \text{ mA/cm}^2$ sowie des Durchtrittsfaktors von $\alpha = 0,575^{+0,109}_{-0,120}$ zeigen, dass die Durchtrittshemmung für die Abscheidung bei $j \approx 10 \text{ mA/cm}^2$ vernachlässigbar gering ist. Der Durchtrittsfaktor $\bar{\alpha} > 0,5$ besagt, dass darüber hinaus die anodische Teilreaktion beschleunigt abläuft, was bei dem Größenverhältnis der Arbeitselektrode von $A \approx 1 \text{ cm}^2$ zur Gegenelektrode von ca. 80 cm^2 zuzüglich der Kupfer-Clippings auch theoretisch zu erwarten ist.

Für die Abscheidung der metallischen Technologie-Demonstratoren in den Galvanoformen der Prozess-Stränge *UV LIGA* und *Röntgen LIGA* sind die verwendeten Parameter in Tabelle 5.9 dargestellt. Beide Stränge beginnen im 1. Schritt mit der Vorbehandlung der Galvanoformen mit einem Katalysator-Elektrolyten, der keine weiteren Additive als den Katalysator beinhaltet. Somit ist gewährleistet, dass der Katalysator zunächst die gesamte Oberfläche aus Photoresist und galvanischer Startschicht bedeckt, bevor im 2. Schritt ein Elektrolyt mit Katalysator (Accelerator 45), Inhibitor (Suppressor 45) und Einebner (Leveler 45) in Konkurrenz hinsichtlich Flächenbelegung der Additive tritt. Diese Elektrolyte im Katholyt-Raum greifen durch ihre hohen Schwefelsäurekonzentrationen die metallischen Dünnschichten an. Daher sollte im 2. Schritt nach dem Einfüllen des Katholyten die Abscheidung nach ca. 1 min gestartet werden. Im Anolyt-Raum befindet sich ein ähnli-

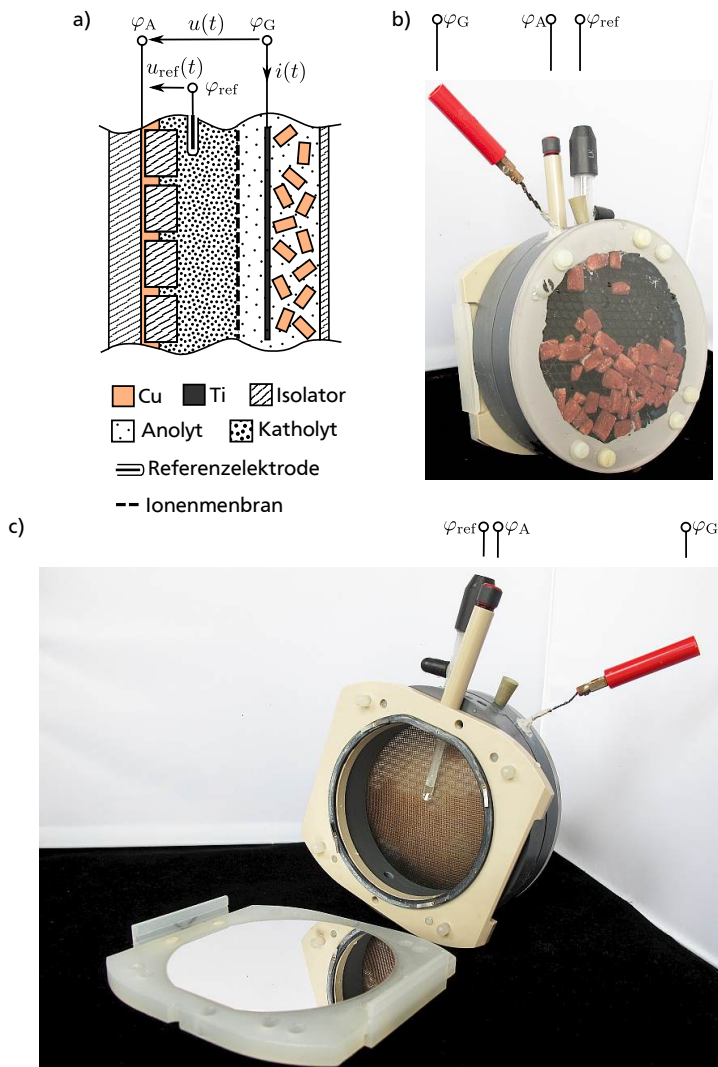


Abbildung 5.17: Selbst aufgebaute Elektrolysezelle auf Basis des Waferhalters *trio clip* der silicet AG, Lohfelden: a) Schematischer Aufbau, b) Geschlossene Zelle mit Sicht durch die Abdeckung des Anolyt-Raums, c) Geöffnete Zelle mit liegendem, Al-beschichtetem 100 mm-Wafer in dessen Aufnahme und dahinter stehendem, übrigen Teil der Zelle mit Blick auf Katholyt-Raum, Referenzelektrode und Ionenmembran.

cher Elektrolyt, jedoch mit einer niedrigeren Schwefelsäurekonzentration und ohne Additive, sodass eine Versorgung des Katholyten mit Cu-Ionen durch die Ionenmembran hindurch gewährleistet ist, vgl. Anhang C.2.4.

Tabelle 5.9: Parameter zum strukturierten galvanischen Abscheiden der Technologie-Demonstratoren aus Kupfer.

Schritt	Parameter
<p>Vorbehandlung mit Katalysator-Elektrolyt bei 21°C. Katholyt: Cu Everplate 300, Atotech USA Inc:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40 g/l Cu • 80 g/l H₂SO₄ 98% • 50 mg/l Cl⁻ • 3 g/l Fe(II) • 8 ml/l Accelerator 45 	<p>Vorbehandlungs-Elektrolyt in Katholyt-Kammer einfüllen, kurz warten und direkt wieder ablassen. Gesamtdauer: 1 min.</p>
<p>Cu-Abscheidung aus saurem Elektrolyten bei 21°C. Katholyt: Cu Everplate 300, Atotech USA Inc:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40 g/l Cu • 80 g/l H₂SO₄ 98% • 50 mg/l Cl⁻ • 3 g/l Fe(II) • 8 ml/l Accelerator 45 • 2 ml/l Suppressor 45 • 5 ml/l Leveler 45 <p>Anolyt: selbst erstellt</p> <ul style="list-style-type: none"> • 40 g/l Cu • 8 g/l H₂SO₄ 98% • 50 mg/l Cl⁻ • 3 g/l Fe(II) 	<p>Direkt nach Ablassen des Vorbehandlungs-Katholyten den Katholyten zum Abscheiden einfüllen und ca. 1 min warten bis evtl. entstandene Bläschen aufgestiegen sind. Metalldicke: 800 µm (<i>UV LIGA</i>) bzw. > 200 µm (<i>Röntgen LIGA</i>)</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>UV LIGA</i> 8 600 As = 143,3 A min bei 5,1 cm² geometrisch aktiver Arbeitselektroden-Fläche mit stromgeführter Umkehrpulsabscheidung: 50,1 ms @ 61 mA Abscheiden, 2 ms @ -150 mA Abtragen. 5 000 As bei 5,7 cm² geometrisch aktiver Arbeitselektroden-Fläche mit stromgeführter Umkehrpulsabscheidung: 50,1 ms @ 67 mA Abscheiden, 2 ms @ -144 mA Abtragen. Anschließend sofort gründlich mit Reinstwasser spülen. • <i>Röntgen LIGA</i> mind. 2 000 As = 33,3 A min bei ca. 1 cm² geometrisch aktiver Arbeitselektroden-Fläche mit spannungsgeführter Umkehrpulsabscheidung: 51 ms @ $u_{\text{ref}} = 160 \text{ mV}$ Abscheiden, 2 ms @ $u_{\text{ref}} = -590 \text{ mV}$ Abtragen. Anschließend sofort gründlich mit Reinstwasser spülen.

In dieser Konfiguration mit einer Arbeitselektrode aus galvanisch abgeschiedenem Kupfer liegt das Ruhepotential der gesättigten Ag/AgCl-Elektrode bei $u_{\text{ref}} = -98 \text{ mV}$. Vor Start der Abscheidung misst man jedoch $u_{\text{ref}} \approx -90 \text{ mV}$,

da die dünne Al-Beschichtung der galvanischen Startschicht in Randbereichen unterhalb des Photoresists noch in geringem Umfang elektrochemisch aktiv ist.

Um den Aufwand der selbst durchgeführten Fertigung einzuschränken, ist die Abscheidung im Prozess-Strang *UV LIGA* darauf ausgelegt, das Planarisieren nach Abbildung 5.2 e) auszulassen, sodass ein Überwachsen vermieden werden sollte. Hier hat sich die Abscheidung mit einer stromgeführten Umkehrpulsabscheidung als praktikabel herausgestellt, da sich die Prozesszeit besser vorhersagen lässt als bei spannungsgeführter Umkehrpulsabscheidung.

Die Abscheidung im Prozess-Strang *Röntgen LIGA* ist stärker von Defekten in der Opferschicht beeinflusst, da große Flächen des Wafers damit abgedeckt sind, vgl. Abbildung 5.3 b). Um dennoch reproduzierbar Abscheideparameter einstellen zu können, hat sich die Abscheidung mit der spannungsgeführten Umkehrpulsabscheidung als praktikabel herausgestellt. Um trotz der Defekte der Opferschicht ein zuverlässiges Füllen der Galvanoformen sicher zu stellen, wird die Abscheidung wesentlich über die Zielhöhe hinaus fortgesetzt und anschließend wird planarisiert.

Auf Basis der CAD-Daten geometrisch berechnet hat der aktive Bereich der galvanischen Startschicht im Prozess-Strang *Röntgen LIGA* eine Fläche von $0,95 \text{ cm}^2$ und somit bilden die Stromdichte-Potentialkurven in Anhang C.2.6 die grundsätzliche Situation der Abscheidung innerhalb der unteren Galvanoform ab. Darüber hinaus zeigt Abbildung 5.18 beispielhaft die gemessenen Zeitverläufe der Spannung (a), des Stroms (b), deren gemittelten Werte (c) und der Ladung (d) für die spannungsgeführte Umkehrpulsabscheidung der Technologie-Demonstratoren aus Kupfer im Prozess-Strang *Röntgen LIGA* gemäß Tabelle 5.9. Aus den Verläufen über zwei Perioden (a) und (b) ist der Effekt der kapazitiven Umladung deutlich am Überschwingen nach den Sprüngen sowie am exponentiellen Abklingen des Überschwingens zu erkennen. Dieser Effekt ist für das Abtragen deutlich geringer als für das Abscheiden, was die Wahl der kurzen Dauer für den Abtrags-Puls rechtfertigt.

Nimmt man jede Minute die Signalverläufe über zwei Perioden auf und mittelt über diese, erhält man den in Abbildung 5.18 c) dargestellten Verlauf. Das gemittelte Potential der Referenzelektrode bleibt über die dargestellten 7 Stunden der Abscheidung bei $u_{\text{ref}} \approx 131 \text{ mV}$. Die kleinen Schwankungen

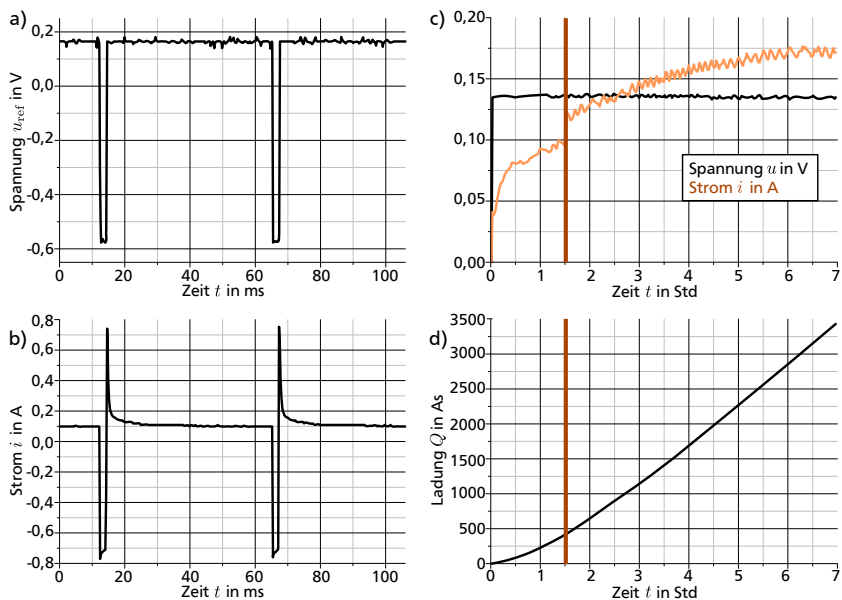


Abbildung 5.18: Messwerte während der spannungsgeführten Umkehrpulsabscheidung, der metallischen Technologie-Demonstratoren im Prozess-Strang *Röntgen LIGA* gemäß Tabelle 5.9: a) Spannungsverlauf über zwei Perioden, b) Stromverlauf über zwei Perioden, c) gemittelter Spannungs- und Stromverlauf über die gesamte Abscheidedauer, d) Ladungsverlauf über die gesamte Abscheidedauer.

sind im Wesentlichen auf die Wahl des Zeitfensters für die jeweilige Messung zurückzuführen, je nachdem ob Beginn und Ende des Fensters in die Bereiche der Gegenpulse fällt oder nicht. Ähnliches gilt für den gemittelten Verlauf des Stroms. Der anfängliche Anstieg des Stroms ist auf die Vergrößerung der aktiven Arbeitselektroden-Fläche durch die Ausbildung einer rauer galvanisch abgeschiedenen Schicht auf einer extrem glatten metallischen Dünnschicht zurückzuführen. Der folgende Anstieg des Stroms rührt vor allem aus der Vergrößerung der aktiven Arbeitselektroden-Fläche durch Ausbilden von Überwachsungen her.

Geht man von 100% Stromausbeute aus, berechnen sich die abgeschiedene Schichthöhe d sowie die Abscheiderate \dot{d} unter Verwendung des Faraday'schen Gesetztes (2.1) zu

$$d = \frac{V_{\text{mol}}}{zF} \int j dt \quad (5.2)$$

$$\dot{d} = \frac{V_{\text{mol}}}{zF} j \quad (5.3)$$

mit

$$V_{\text{mol}} = \text{Molares Volumen} \quad [V_{\text{mol}}] = \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$$

Bei 100% Stromausbeute und einer Stromdichte $j = 50 \text{ mA/cm}^2$ ergibt sich für Kupfer eine Abscheiderate von $\dot{d} = 1,05 \mu\text{m/min}$. Läge eine Arbeitselektroden-Fläche $A = 1 \text{ cm}^2$ vor, würde man die Füllhöhe der unteren Galvanoform $d = 100 \mu\text{m}$ bei einer Ladung $Q = jAd/\dot{d} = 286 \text{ As}$ und die Füllhöhe der oberen Galvanoform $d = 290 \mu\text{m}$ bei einer Ladung $Q = jAd/\dot{d} = 829 \text{ As}$ erreichen. Bei diesen Ladungsmengen würde man in Abbildung 5.18 c) einen Anstieg im Kurvenverlauf des Stroms sowie in Abbildung 5.18 d) einen Knick im Kurvenverlauf der Ladung sehen.

Fehler in der Opferschicht führen jedoch zu einer größeren aktiven Arbeitselektroden-Oberfläche, die sich durch die Ausbildung halbsphärischer Überwachungen stetig vergrößert, vgl. Abbildung 2.13 c). Außerdem senkt der Einsatz des Redoxmediators $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ die Stromausbeute. Somit verschieben sich die Anstiege im Stromverlauf, die vom Erreichen der Füllhöhen von den Galvanoformen herrühren, hin zu größeren Ladungen und fallen durch den geringeren Anteil am Gesamtstrom weniger deutlich aus. Das vollständige Auffüllen der unteren Galvanoform lässt sich damit nach Abbildungen 5.18 c) und d) auf $Q \approx 430 \text{ As}$ und 95 min nach Start der Abscheidung datieren. Somit liegt eine Wachstumsrate von $\dot{d} \approx 1 \mu\text{m/min}$ für die untere Galvanoform vor. Dazu ist eine Stromdichte $j \approx 50 \text{ mA/cm}^2$ notwendig. Dieses Wertepaar $u_{\text{ref}} \approx 131 \text{ mV}$ und $j \approx 50 \text{ mA/cm}^2$ entspricht dem aus Abbildung C.5 im Anhang zu entnehmenden Wert für eine Anstiegs-geschwindigkeit von $\dot{u}_{\text{ref}} = 10 \text{ mV/s}$. Somit liegt ein Abscheidungsregime vor, in dem laut Hersteller und in Vorversuchen bestätigt sehr feinkristalline und duktile Materialeigenschaften entstehen. In diesem Regime ist der Katalysator besonders aktiv, was sich in Abscheidungsversuchen in der unteren Galvanoform durch eine schnellere Ausbildung der Überwachungen am

oberen Ende des Biegestabs im Vergleich zu den umgebenden Blöcken ausdrückt. Das Auffüllen der oberen Galvanoform ist in Abbildungen 5.18 c) und d) nicht mehr auszumachen. Dies rechtfertigt den Ansatz, deutliche Überwachungen in Kauf zu nehmen, um das Auffüllen der oberen Galvanoform in jedem Fall sicher stellen zu können.

Abbildung 5.19 zeigt Zwischenergebnisse der Fertigung aus den Prozess-Strängen *UV LIGA* und *Röntgen LIGA*. Im Fall *UV LIGA* ist noch deutlich erkennbar, wie zunächst halbsphärische Überwachungen am oberen Ende des Biegestabs ausgeformt wurden, die anschließend mit den Überwachungen der restlichen unteren Galvanoform verschmolzen sind. Bei der Fertigung dieser Struktur wurde eine geringfügige Anströmung des Elektrolyten im Bild von unten rechts nach oben links verwendet, was die Form der Abscheidung im Randbereich der Kupferstruktur erklärt. Darüber hinaus ist im Bild oben in einer Ecke der Lackstruktur ein Riss zu erkennen. Dieser Effekt tritt auf, wenn der vernetzte und entwickelte Photoresist AZ 125 nXT trocknet, weshalb dies innerhalb der Prozesskette vor der galvanischen Abscheidung verhindert wird. Im Fall *Röntgen LIGA* ist durch die sehr weit fortgeführte Überwachung kein Artefakt der halbsphärischen Überwachung am oberen Biegestabende mehr zu erkennen. Die hier dargestellte Form der Überwachung stellt sich reproduzierbar bei der Abscheidung ohne Anströmung ein und lässt sich anschaulich durch die oben beschriebene Wirbelausbildung ähnlich dem Bénard-Experiment erklären.

5.8 Planarisiertes Cu

Um Höhe und Form der Kupferstruktur definiert einstellen zu können, ist ein Planarisierungsschritt nötig. Dabei werden Kupfer und Photoresist aller Elemente des Wafers gleichmäßig abgetragen auf eine Höhe unterhalb der Oberkante der oberen Galvanoform. So kann sichergestellt werden, dass alle lateral ausgebildeten Überwachungen entfernt werden und nur durch die Galvanoformen definierte Strukturabmessungen des Technologie-Demonstrators bestehen bleiben, vgl. Abbildung 5.2 e). In Voruntersuchungen hat sich herausgestellt, dass durch diesen Prozessschritt viele Strukturen vom Wafer abgelöst werden können bzw. der Wafer leicht brechen kann. Wenn möglich ist dieser sehr riskante Prozessschritt also auszulassen, weshalb im Fall *UV LIGA* darauf verzichtet wird. Im Fall *Röntgen LIGA* hat sich der Prozessschritt als unverzichtbar herausgestellt, da Fertigungsfehler zu geringeren als geplanten Stabdurchmessern geführt haben und somit hohe

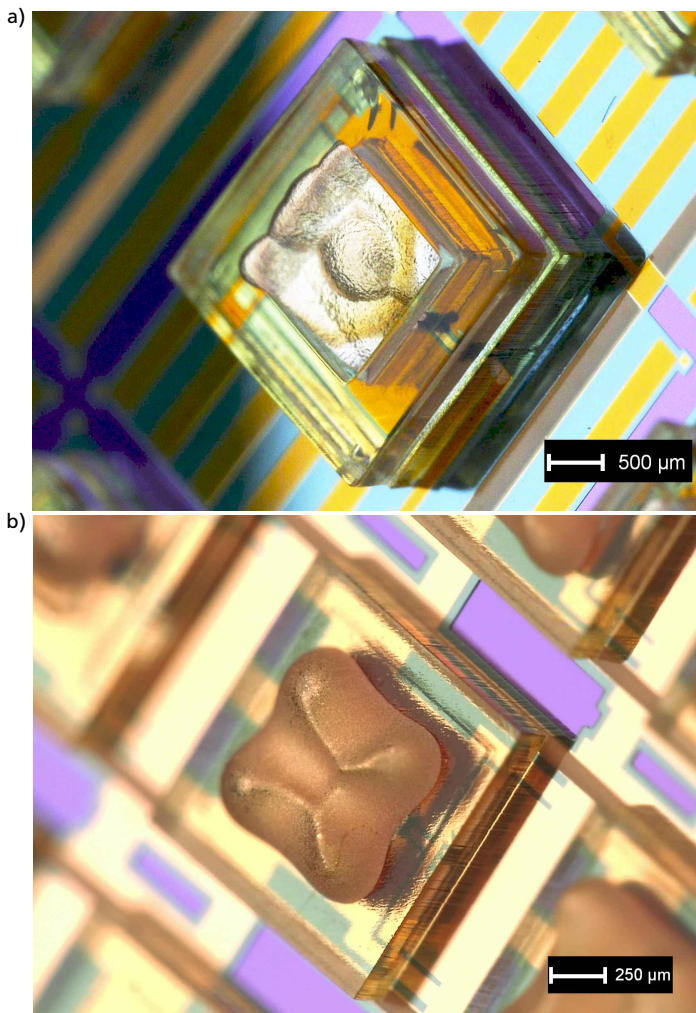


Abbildung 5.19: Beispielhafte Zwischenergebnisse nach den Kupferabscheidungen in die Galvanoformen: a) *UV LIGA* mit $d_W = 40\text{ }\mu\text{m}$, b) *Röntgen LIGA* mit $d_W = 7\text{ }\mu\text{m}$.

Masseblöcke die Knicksicherheit absenken würden. Es ist also mit größter Vorsicht bei der Handhabung zu planarisieren.

Für den Planarisierungsschritt kommt die Läpp- und Polier-Anlage PM5 der Firma Logitech (Struers GmbH, Willich) zum Einsatz. Dazu wird der 100 mm-Wafer durch Vakuumansaugung an einer Halterung fixiert, die ihn kopfüber mit definierter Kraft von oben auf eine große, plane, rotierende Scheibe aufpresst. Auf dieser Scheibe befindet sich ein Flüssigkeitsfilm mit Schleifpartikeln, sodass durch eine laterale Schleifbewegung sowohl das Kupfer als auch der Photoresist gleichmäßig mit Hilfe der Schleifpartikel abgetragen werden. Besonders zu beachten ist die zuverlässige und gleichmäßige Benetzung der Scheibe mit diesem Läppmittel über die gesamte Dauer des mehrstündigen Prozessschritts. Weiterhin ist zu beachten, dass anfangs die mit dem Läppmittel in Kontakt stehende Kupferoberfläche des Wafers sehr gering ist und dadurch bei geringen Anpresskräften bereits sehr hohe Anpressdrücke entstehen können.

Auch die Verkleinerung der mit dem Läppmittel in Kontakt stehenden Kupferoberfläche des Wafers bei gleichbleibender Anpresskraft stellt eine Druckerhöhung dar. Dieser Fall tritt sehr plötzlich ein, wenn die Überwachungen vollständig abgetragen sind und die kleinere Oberfläche der Kupferstrukturen innerhalb der oberen Galvanoform mit dem Läppmittel in Kontakt steht. Die Anpresskraft ist also als Vorsichtsmaßnahme kurz vor diesem plötzlichen Übergang in einem Moment wesentlich zu reduzieren, in dem die größte mit dem Läppmittel in Kontakt stehende Kupferoberfläche vorliegt und damit eigentlich eine hohe Kraft für vertretbare Prozesszeiten nötig wäre. Zudem ist der Moment dieses Übergangs innerhalb des Prozesses nur auf einige 10 µm genau vorherzusagen und nach dem Übergang liegt eine deutlich schnellere Abtragsrate im direkten Umfeld der Zielhöhe vor. Vor und nach dem Übergang ist daher ein erheblicher Zeitaufwand der manuellen Prozessüberwachung nötig. Tabelle 5.10 stellt die erfolgreich eingesetzten Parameter für diesen Prozessschritt dar.

Darüber hinaus bilden Läppmittel und Abraum einen stark anhaftenden Film aus, der sich ohne mechanische Verfahren nicht entfernen lässt, vgl. Abbildung 5.20 a). Selbst bei der anschließenden Verwendung von Poliermittel bildet sich ein solcher Film aus, sodass hier ein abschließender Schleifschritt mit einem sehr feinen Wasserschleifpapier zur Anwendung kommt, wodurch Rückstände auf ein Minimum reduziert werden können, vgl. Abbildung 5.20 b).

Tabelle 5.10: Parameter zum Planarisieren der in Photoresist eingebetteten Technologie-Demonstratoren aus Kupfer.

Schritt	Parameter
Abkürzungen: <i>Rot</i> = Plattenrotation, <i>Rat</i> = Abtragsrate, <i>F</i> = Anpresskraft, $d_{\text{Cu,max}}$ = max. Dicke der Kupferstrukturen, $d_{\text{Cu,soll}}$ = Soll-Dicke der Kupferstrukturen, $d_{\text{Res,max}}$ = max. Dicke des Photoresists, d_{Wafer} = Dicke des Wafers	
Dickenmessung mit einem Messtaster	$d_{\text{Cu,max}}$, $d_{\text{Res,max}}$, d_{Wafer}
Wafer auf Halterung mit Vakuuman-saugung befestigen und Anpresskraft der Halterung einstellen	$F \sim 0,7 \text{ N} \rightarrow$ Waagen-Anzeige: $\sim 70 \text{ g}$
<ul style="list-style-type: none"> • Große Platte rotieren und mit L äppmittel benetzen • Wafer in Halterung so aufsetzen, dass die Kupferstrukturen keinem Stoß ausgesetzt sind • Starthöhe des L äppvorgangs bestimmen • Abtragsrate beobachten, <i>F</i> anpassen bis <i>Rat</i> erreicht 	<ul style="list-style-type: none"> • L äppmittel mit $9 \mu\text{m}$ nom. Größe der Al_2O_3-Partikel • 1 Std @ <i>Rot</i> = 5 U/min • <i>Rat</i> = $2 \mu\text{m/min}$
<i>F</i> erhöhen bis <i>Rat</i> erreicht	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Std @ <i>Rot</i> = 10 U/min • <i>Rat</i> = $2 \mu\text{m/min}$
<i>F</i> erhöhen bis <i>Rat</i> erreicht	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Std @ <i>Rot</i> = 15 U/min • <i>Rat</i> = $2 \mu\text{m/min}$
<i>F</i> erhöhen bis <i>Rat</i> erreicht	<ul style="list-style-type: none"> • mehrere Stunden @ <i>Rot</i> = 20 U/min • <i>Rat</i> $\leq 3 \mu\text{m/min}$ @ $F \leq 10 \text{ N}$
<i>F</i> anpassen bis <i>Rat</i> erreicht	<ul style="list-style-type: none"> • von $d_{\text{Res,max}} + 40 \mu\text{m}$ bis $d_{\text{Cu,soll}} + 10 \mu\text{m}$ • <i>Rot</i> = 20 U/min • <i>Rat</i> = $1 \mu\text{m/min}$
Wafer reinigen	5× mit Wasser spülen und trocken blasen
Mit feinem Nass-Schleifpapier abschleifen	<ul style="list-style-type: none"> • Nassschleifpapier mit Körnung 4 000 • 3× 1 min @ <i>Rot</i> = 50 U/min, nach jeder min neues Schleifpapier • $F = 5 \text{ N} \rightarrow$ Waagen-Anzeige: $\sim 500 \text{ g}$
Wafer reinigen	5× mit Wasser spülen und trocken blasen

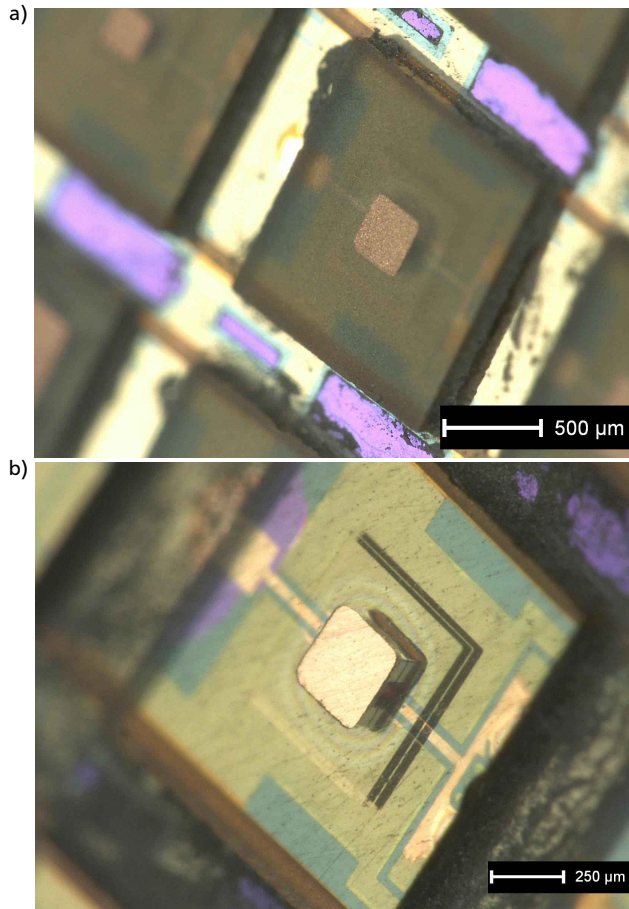


Abbildung 5.20: Zwischenergebnisse nach Planarisieren: *Röntgen LIGA* mit $d_W = 4 \mu\text{m}$, a) abgeschlossener Läppvorgang, b) anschließend mit Schleifpapier behandelt.

5.9 Vereinzelte Chips

Das Vereinzeln des 100 mm-Wafers in 197 Chips im Fall *UV LIGA* bzw. 272 Chips im Fall *Röntgen LIGA* dient dem mechanischen und elektrischen Trennen der Chips und geschieht durch gewöhnliches Wafersägen mit dem Apparat DISCO DAD 341. Dazu wird der jeweilige Wafer auf eine selbstklebende Folie mit besonders hoher Haftkraft aufgebracht und mit einem hoch drehenden Sägeblatt direkt vollständig durchtrennt, vgl. Parameter in Tabelle 5.11. Das Durchtrennen der gesamten Waferdicke in nur einem Schritt stellt eine geringere Belastung für die Strukturen auf der Waferoberfläche dar, als wenn man in mehreren Schritten schneiden würde.

Tabelle 5.11: Parameter zum Vereinzeln der Chips.

Schritt	Parameter
Aufkleben auf Folie	UV PeelingTape UDT-1325D von MINITRON Elektronik GmbH, Ingolstadt
Warten zur Erhöhung der Haftkraft	> 2 Std
Durchsägen mit Schnitttiefe bis in die Folie hinein	<ul style="list-style-type: none">• Sägeblatt Disco P1A851 mit 300 µm Breite• 22 000 U/min• 10 mm/s Vorschub

Die Haftkraft der verwendeten Klebefolie ließe sich durch Belichtung mit UV-Licht wesentlich reduzieren, um die einzelnen Chips entnehmen zu können. Hier verbleiben die Chips jedoch auf der Folie und die Folie wird im folgenden Schritt beim Entfernen aller Polymere mit entfernt.

5.10 Entferntes Polymer

Das Entfernen aller polymeren Materialien – der oberen und unteren Galvanoformen, der Opferschicht und der Trägerfolie für das Vereinzeln – soll die metallischen Technologie-Demonstratoren freistellen, sodass sie sich frei bewegen können. Außerdem soll dieser Prozessschritt die auf der Trägerfolie haftenden Chips ohne mechanische Belastung voneinander trennen. Dies geschieht im Reaktivradikalstrom der Remote-Plasma-Anlage R3T muegge STP 2020 [654–658] mit den in Tabelle 5.12 dargestellten Parametern.

Tabelle 5.12: Parameter zum trockenchemischen Entfernen aller Polymere.

Schritt	Parameter
Veraschung	<ul style="list-style-type: none"> • <i>UV LIGA</i> 40 000 s @ 1000 W, 1000 sccm O₂, 50 sccm CF₄, 50 sccm N₂, 450 mTorr = 0,6 mbar = 60 Pa, Basisplatte @ 25°C • <i>Röntgen LIGA</i> 14 500 s @ 1000 W, 1000 sccm O₂, 50 sccm CF₄, 50 sccm N₂, 450 mTorr = 0,6 mbar = 60 Pa, Basisplatte @ 25°C
Spülen gegen Fluor-Rückstände	600 s @ 1000 W, 1000 sccm O ₂ , 450 mTorr = 0,6 mbar = 60 Pa, Basisplatte @ 25°C

Im Gasstrom werden die Polymere bei niedriger Temperatur verascht, ohne dass die UV-Strahlung von der Plasmakammer zur Probe gelangen würde. Dies trägt im Vergleich zu anderen Apparaten, in denen die Polymere dem Plasma direkt ausgesetzt sind, zur hohen Abtragsrate bei Negativ-Photoresisten bei. Die reaktiven Radikale erzeugen bei ihrer Reaktion eine bläulich emittierende Chemolumineszenz mit sehr geringer Strahlungintensität, sodass der Veraschungsprozess z. T. auch visuell beobachtbar ist. Die Reaktion ist exotherm, es stellt sich also trotz Temperierung der Basisplatte auf 25°C eine höhere Temperatur im Probenhalter ein. Abbildung 5.21 stellt die Endpunkterkennung für diesen Prozess anhand des Temperaturverlaufs im Probenhalter dar. Man erkennt deutlich das Aufwärmen durch die exotherme Reaktion sowie das Absinken der Reaktionsrate, wenn nur noch verborgene Polymere wie Rückstände der Opferschicht oder der Trägerfolie auf dem Probenhalter verblieben sind. Bei diesen Druckverhältnissen ist der Stofftransport in den engen Spalten jedoch verhältnismäßig gut und durch Loading-Effekte der metallischen Wände ist die Abtragsrate in diesen Spalten verhältnismäßig hoch. Begründen lässt sich dies mit der mittleren freien Weglänge nach [659], die hier ca. 117 µm beträgt und damit in der Größenordnung der lateralen Ausdehnung der Spalte liegt:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\pi \sqrt{2} d_M^2 p} \approx 7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Pa}}{p} \text{m} \quad (5.4)$$

mit

$$k_B = \text{Boltzmann-Konstante} = 1,380 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad [k_B] = \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$T = \text{Temperatur} \quad [T] = \text{K}$$

$$d_M = \text{Mittlerer Molekülabstand} \quad [d_M] = \text{m}$$

$$p = \text{Druck} \quad [p] = \text{Pa}$$

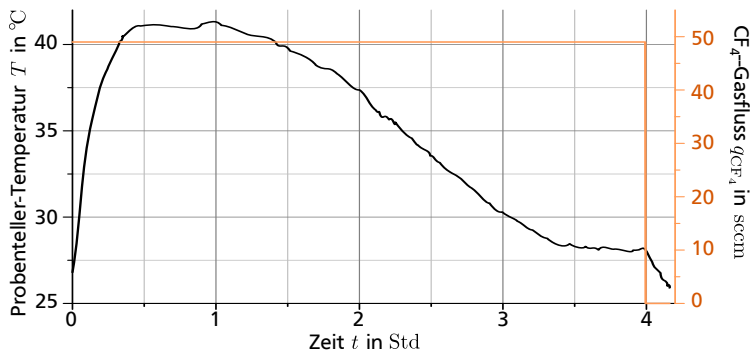


Abbildung 5.21: Temperatur des Probentellers und CF_4 -Gasfluss beim Veraschen eines Wafers aus dem Prozess-Strang *Röntgen LIGA* mit Parametern nach Tabelle 5.12.

Die nun vereinzelt vorliegenden Chips können auf Probenhalter montiert und im Rasterelektronenmikroskop untersucht werden. In der Seitenansicht lässt sich nur ansatzweise das Entfernen der Opferschicht nachweisen, vgl. Abbildung 5.22. Die Struktur in Abbildung 5.22 a) aus dem Prozess-Strang *UV LIGA* zeigt die Vollständigkeit und Stabilität der realisierten Struktur. Ebenso zeigt Abbildung 5.22 b) deutlich, dass der Masseblock der Struktur aus dem Prozess-Strang *Röntgen LIGA* frei beweglich ist.

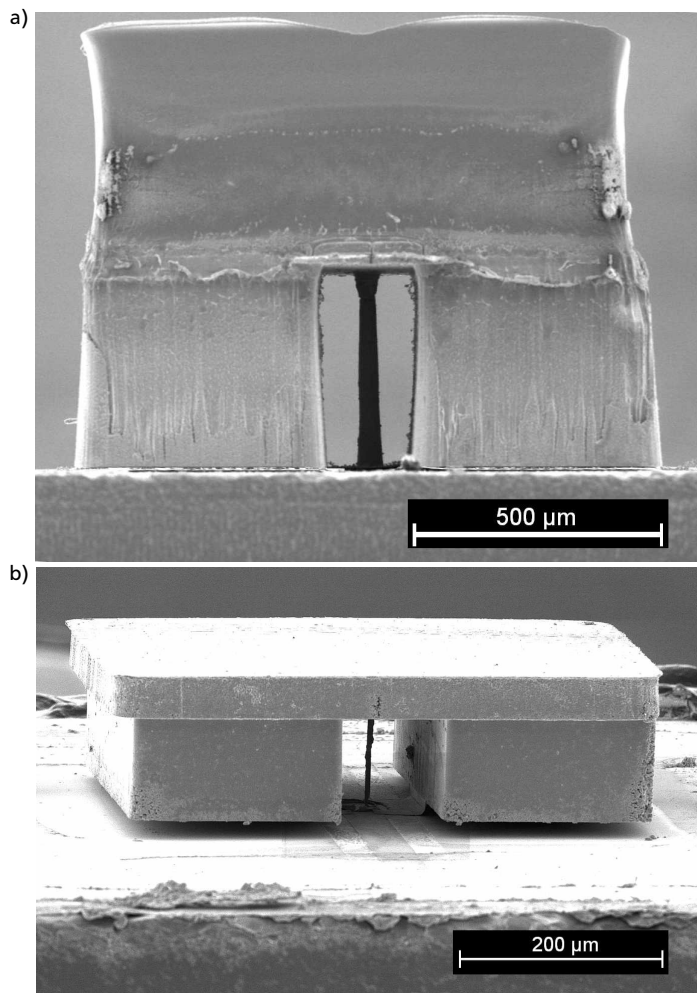


Abbildung 5.22: Beispielhafte Zwischenergebnisse nach Vereinzeln und Entfernen von Galvanoformen und Opferschichten: a) *UV LIGA*: Probe FG316 A06, b) *Röntgen LIGA*: Probe FG342 W10.

5.11 Aufbau- und Verbindungstechnik

Dieser Abschnitt zur Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) beschreibt die Prozessschritte, um einzelne und freigestellte Technologie-Demonstratoren nach Abbildung 5.2 e) zu gehäusten Sensor-Demonstratoren nach Abbildung 5.2 f) aufzubauen, deren Ausgangssignale digital erfasst und aufgezeichnet werden.

Um die Funktion der gefertigten Technologie-Demonstratoren zur Nutzung als einachsige Beschleunigungssensoren nachweisen zu können, ist eine elektronische Schaltung mit differentiell kapazitivem Auswerteprinzip notwendig. Die integrierten Schaltkreise (IC) AD 7745 und AD 7746 [660] bieten diese Funktion bei laut Datenblatt einer Messunsicherheit von 4 fF, einer Auflösung von bis zu 4 aF und einem digitalen Ausgangssignal mit Codierung für den seriellen Datenbus I²C, vgl. Auszüge aus dem Datenblatt in Anhang D.4.1 und insbesondere Hinweise zur differentiell kapazitiven Auswertung in Abbildung D.4. Für reproduzierbare Messsignale ist dieses Bauteil über möglichst kurze Leitungen mit den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Strukturen zu verbinden. Abbildung 5.23 stellt schematisch den Anschluss des IC an die Zentralelektrode und die beiden Gegenelektroden des Technologie-Demonstrators dar. Die linke Kapazität C_l wird über den Anschluss CIN(-), die rechte Kapazität C_r über den Anschluss CIN(+) ausgewertet. Beide Anschlüsse können innerhalb des IC mit den Ausgängen von kapazitiven Digital-Analog-Wandlern (CAPDAC) mit einer Auflösung von 164 fF beaufschlagt werden, die wie „negative Kapazitäten“ wirken. Durch ihre programmierte Konfiguration lässt sich der Wert der Kapazitätsdifferenz ΔC ändern und beispielsweise im Fall $a_x = 0$ g zu nahe 0 setzen. Der Kapazität-zu-Digital-Wandler (CDC) liefert schließlich ein digitales Ausgangssignal entsprechend ΔC , das über den seriellen Datenbus übertragen wird.

Im Fall *UV LIGA* ist die Kontaktschicht so ausgelegt, dass die Anschlüsse des mit Kunststoff gehäusten IC direkt auf die Leiterbahnen der Kontaktschicht aufgelötet werden können. Das umgebende Keramik-Gehäuse für den gesamten Sensor-Demonstrator ist so ausgewählt, dass die Anschlüsse des IC ebenfalls direkt auf die inneren Kontakte des Keramik-Gehäuses aufgelötet werden können, vgl. Datenblatt des Keramik-Gehäuses CSB01652 im Anhang D.4.2. Abbildung 5.24 a) stellt die beiden Varianten für den Aufbau innerhalb des Keramik-Gehäuses schematisch dar. Abhängig von der horizontalen Position des Technologie-Demonstrators auf dem Wafer ergeben sich

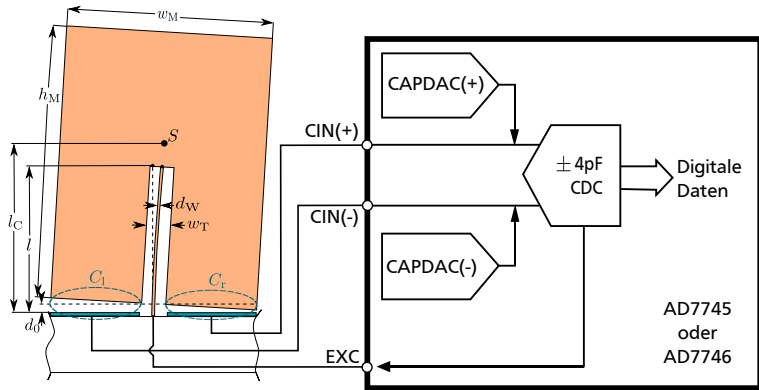


Abbildung 5.23: Schema für den Anschluss des Technologie-Demonstrators an das Kapazität-zu-Digital-Wandler IC AD 7745 bzw. AD 7746.

durch das Design der Kontaktschicht zwei alternative Aufbauweisen. In beiden Fällen sind die digitalen Signalleitungen vom Substrat des Technologie-Demonstrators fern zu halten, um eine Störung der Kapazitätsmessung zu vermeiden. Dies ist teilweise mit Kupferlitze auf der Unterseite des IC realisiert, denn dort ist der Schaltkreis intern durch eine durchgehende Kupferplatte geschirmt. Abbildung 5.24 b) gibt beispielhaft einen aufgebauten Sensor-Demonstrator ohne Deckel wieder. Für den Schutz des mikromechanischen Technologie-Demonstrators sowie die elektromagnetische Abschirmung kommt anschließend ein Messing-Deckel zum Einsatz. Zwischen den Versorgungsanschlüssen des IC ist ein Kondensator der SMD-Baugröße 0402 mit $C = 1 \mu F$ zur Stabilisierung aufgelötet. Alle nicht verwendeten Anschlüsse liegen auf Masse-Potential, ebenso wie die Bodenplatte und der Gehäusedeckel, wobei Erdschleifen vermieden werden. Ein transparenter Klebstoff fixiert alle Bauteile im Gehäuse. Tabelle 5.13 stellt die verwendeten Parameter zum Aufbau der Sensor-Demonstratoren dar. Für die *UV LIGA* Sensor-Demonstratoren gibt Anhang D.4.3.1 die Anschlussbelegungen der inneren und der äußeren Kontakte am Keramik-Gehäuse wieder.

Tabelle 5.13: Parameter zum Aufbau des Sensor-Demonstrators im Fall *UV LIGA* unter Verwendung des Mikromontageplatzes TOMM1 von arteos GmbH, Seligenstadt.

Schritt	Parameter
Löten	<ul style="list-style-type: none"> • Lotpaste: FP-3 Sn63Pb36Ag ROL1 (Partikeldurchmesser 25..45 μm) von Martin GmbH, Wessling • Dosiernadel: Innendurchmesser 200 μm (weiß) von I and Peter Gonano, Breitenstetten • Löten: Heizplatte mit Messing-Sockel zum Auflegen des Keramik-Leergehäuses auf 240°C vorheizen, dann Bauteile mit Lotpaste unter Sichtkontrolle maximal 2 min auflegen
Verkleben	<ul style="list-style-type: none"> • UV-härtender Klebstoff: Vitralit 1605 (Vikosität: 300..500 mPa s) von Panacol-Elosol, Steinbach • UV-Quelle: Dymax 5000 Flood (Hg-Dampf Lampe, Intensität: 225 mW/cm²) von Dymax Europe GmbH, Wiesbaden • Aushärten: 5 × 1 min in 11 cm Abstand vom Lampengehäuse belichten bei jeweils zwischenzeitlichem Ersatz des Messing-Sockels durch einen kalten Sockel

Die AVT für den Fall *Röntgen LIGA* erfolgt analog mit den gleichen Bauteilen, jedoch sind zur Kontaktierung des Chips mit dem metallischen Technologie-Demonstrator Bonddrähte auf die Leiterbahnen der Kontaktschicht zu kleben, vgl. Anhang D.4.3.2. Ein direkter Lötvorgang wie bei *UV LIGA* ist aus Platzgründen nicht realisierbar und ein gewöhnlicher Drahtbondprozess würde durch das Ultraschallaufreiben der Kontaktstellen eine zu große mechanische Belastung für die Technologie-Demonstratoren mit sich bringen.

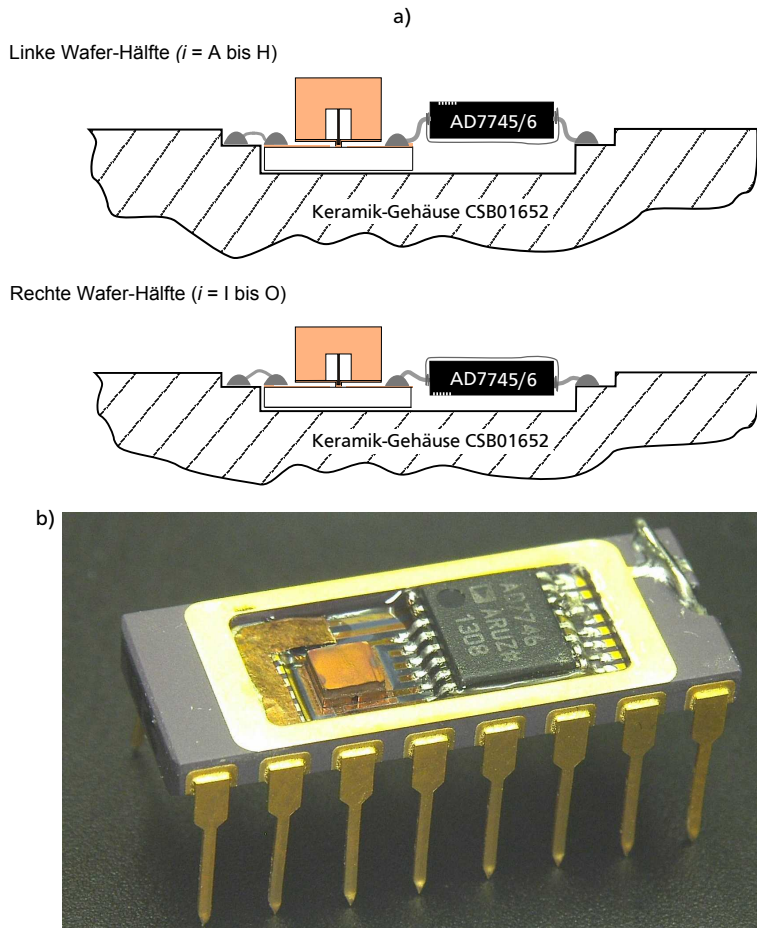


Abbildung 5.24: AVT der Variante *UV LIGA*: a) Konzept für die Strukturen auf der linken Waferhälfte (Spalten $i = A$ bis H nach Abbildungen 5.3 und 5.5) und der rechten Waferhälfte (Spalten $i = I$ bis O), b) Beispielhafte Realisierung für die linke Waferhälfte ($i = A$ bis H).



6 Charakterisierung der Technologie-Demonstratoren

Dieses Kapitel beschreibt die Charakterisierung der gefertigten Technologie-Demonstratoren, um an ihnen die Eigenschaften der einzelnen Prozessschritte sowie das Verhalten der Gesamtsysteme nachzuweisen. Die Untersuchung der Zwischenergebnisse während der Fertigung mit dem Auflichtmikroskop erlaubt meist nur qualitative Aussagen über die Fertigungsqualität. Erst anhand der vom Photoresist freigestellten metallischen Strukturen lassen sich quantitative Aussagen zu den senkrecht stehenden Stäben treffen.

Mikroskopisch untersucht werden vereinzelte Proben von Wafern, die erfolgreich die mehrere Wochen dauernde Fertigung durchlaufen haben. Ist die Präparation der Einzelproben gelungen, können sie im Rasterelektronenmikroskop analysiert werden. Funktioniert darüber hinaus im Schritt AVT die Integration der empfindlichen Technologie-Demonstratoren zu Sensor-Demonstratoren, kann daran die Untersuchung des Übertragungsverhaltens stattfinden.

6.1 Mikroskopische Untersuchungen

Um die Parameterbereiche der einzelnen Prozessschritte einstellen und überwachen zu können, sollten zur Qualitätskontrolle während der Fertigung zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren zum Einsatz kommen. Dies ist besonders bei der Vollständigkeit der Photoresistentwicklung im Bereich der Öffnungen zur Abscheidung der senkrecht stehenden Stäbe mit hohem Aspektverhältnis wichtig. Jedoch ist dies nur bedingt möglich, unter anderem da die sehr dicken Photoresiste hoch transparent und deren Rückstände kaum sichtbar sind. Im Fall *UV LIGA* muss die entwickelte Galvanoform mit Wasser benetzt bleiben um Rissbildung beim Trocknen des Photoresists zu vermeiden, was die Möglichkeiten der Bildgebung weiter einschränkt. Im Fall *Röntgen LIGA* sind die Aspektverhältnisse so hoch, dass sich aus der Auflichtmikroskopie keine verlässlichen Aussagen erzielen lassen. Für die Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop kommt eine Metallisierung der Oberfläche nicht in Frage, sodass eine Untersuchung mit einem speziellen Rasterelektronenmikroskop (Environmental Scanning Electron Microscope – ESEM – am Karlsruher Institut für Technologie) nötig ist, womit der

Nachweis über die vollständige Entwicklung der Galvanoform jedoch auch nicht gelingt. Erst durch die galvanische Abscheidung und das anschließende Entfernen der Photoresiste wird der Nachweis möglich.

Die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen mit dem Auflichtmikroskop Keyence VHX-600D unter Verwendung der Objektive VH-Z20R und VH-Z100UR sowie mit dem Rasterelektronenmikroskop Philips XL30-FEG sind für den Fall *UV LIGA* in Tabelle 6.1 und für den Fall *Röntgen LIGA* in Tabelle 6.2 aufgeführt. Der erste Teil des Namens ist die Bezeichnung des Wafers, der zweite Teil ist die Bezeichnung der Position auf dem Wafer mit alphabetischer Bezeichnung der Spalte (i) und numerischer Bezeichnung der Zeile (j). Für den Vergleich mit den Parametern der Auslegung nach Abbildung 4.4 a), Tabellen 4.3, 4.4 und 4.5 sind die angestrebten Parameter mit dem Index „soll“ gekennzeichnet, die realisierten mit dem Index „ist“.

Die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen weisen Fehler durch die Einstellung des Fokus, der Betrachtungswinkel und der Bilddatenauswertung auf. Hinzu kommen Fehler durch die Einstellung der Vergrößerung am Auflichtmikroskop, da dort ein mechanisches Spiel auftritt. Außerdem ist auch die Kalibration der Mikroskope fehlerbehaftet, was im Rahmen einer zwischenzeitlich durchgeführten Rekalibration besonders aufgefallen ist. Die mit verschiedenen Mikroskopen und Objektiven zu unterschiedlichen Zeitpunkten ermittelten Messergebnisse von einer konstanten Strukturweite einer Probe variieren um bis zu 9%. Soweit verfügbar, sind in den Tabellen die mit dem Rasterelektronenmikroskop ermittelten Messergebnisse angegeben.

UV LIGA

Die Technologie-Demonstratoren des Prozessstrangs *UV LIGA* nach Tabelle 6.1 haben alle einen größeren Stabdurchmesser $d_{W,ist}$ als den ausgelegten $d_{W,soll}$. Der kleinste Durchmesser tritt beim Abstand vom Substrat in vertikaler Richtung $z \approx 0,85l$ auf, der größte bei $z = 0$, vgl. Abbildungen 5.22 a) und 6.1 a). Die Breite des Masseblocks $w_{M,ist}$ liegt nahe am ausgelegten Wert $w_{M,soll}$. Im Bereich $z > l$ oberhalb des oberen Stabendes ist sie etwas kleiner, im Bereich $z < l/2$ etwas größer. Die Länge des Stabs l_{ist} hängt im Wesentlichen von der Dicke des Photoresists für die untere Galvanoform – Ebene 4 – ab. Die Strukturen in den Randbereichen der Wafer weisen größere Abweichungen auf als die nah des Zentrums. Die Höhe des Masseblocks $h_{M,ist}$ variiert stark, was auf den Verzicht auf das Planarisieren zurückzuführen

Tabelle 6.1: Auswahl charakterisierter Proben aus dem Prozessstrang *UV LIGA* mit Soll-Werten nach Tabellen 4.3 und 4.4 und gemessenen Ist-Werten. Alle Werte in μm außer φ .

Name	$d_{W,\text{soll}}$	$d_{W,\text{ist}}$	$w_{M,\text{soll}}$	$w_{M,\text{ist}}$	l_{soll}	l_{ist}	$h_{M,\text{soll}}$	$h_{M,\text{ist}}$	$w_{T,\text{soll}}$	$w_{T,\text{ist}}$	$d_{0,\text{soll}}$	$d_{0,\text{ist}}$	φ_{soll}	φ_{ist}
FG316 A06	30	28-53	1123	1054-1126	400	407	800	730-925	220	163-192	8	9-11	90°	91,7°
FG316 O10	30	35-49	1123	993-1093	400	354	800	735-904	220	166-188	8	8,6	90°	91,4°
FG316 J02	35	40-50	1379	1367-1404	400	409	800	650-820	220	185-215	8	7,5-10	90°	92,1°
FG316 B08	35	41-51	1379	1305-1397	400	405	800	700-835	220	215-225	8	8,0	90°	90,7°
FG316 F03	40	42-61	1647	1577-1712	400	409	800	665-895	220	201-220	8	7,5-8,5	90°	91,4°
FG316 K03	40	45-65	1647	1590-1687	400	383	800	654-743	220	193-203	8	8-9	90°	90,7°
FG316 Q08	40	46-68	1647	1307-1427	400	393	800	860-880	220	182-199	8	8-9	90°	91,2°
FG316 N07	40	47-63	1647	1596-1650	400	373	800	685-804	220	187-209	8	9,0	90°	91,7°
FG316 J01	40	47-67	1647	1623-1719	400	398	800	815-845	220	208-222	8	18-26	90°	91,1°
FG316 M06	40	49-67	1647	1565-1670	400	372	800	870-880	220	194-213	8	8,5-9,5	90°	92,1°
FG316 K01	45	53-75	1927	1897-1960	400	388	800	753-863	220	191-204	8	9-10	90°	91,0°
FG316 G02	50	58-70	2218	2160-2270	400	402	800	612-891	220	191-205	8	9,0	90°	91,0°
FG316 P06	50	65-75	2218	2105-2230	400	367	800	600-671	220	187-200	8	7,5-8,5	90°	91,7°

ist. Abbildung 6.1 b) zeigt die Oberfläche eines Masseblocks. Deutlich zu erkennen ist die ansetzende Überwachsung der Galvanoform an der rechts unten dargestellten Oberkante sowie die geringere Höhe des Metallblocks an der links oben dargestellten Oberkante. Die Breite der mittleren Aussparung im Masseblock $w_{T,\text{ist}}$ ist geringer als bei der Auslegung vorgesehen. Die größte Breite tritt bei $z \approx 0,85l$ auf, die kleinste bei $z = d_0$. Die Höhe des Luftspalts $d_{0,\text{ist}}$ lässt sich mikroskopisch nur eingeschränkt nachweisen, die Messergebnisse lassen jedoch den Schluss zu, dass $d_{0,\text{ist}}$ nah am Sollwert liegt.

Die Abweichungen sind im Wesentlichen auf Effekte bei der Lithographie besonders dicker Photoresistschichten zurückzuführen:

- Das einfallende Licht ist nicht vollständig parallel, da der verwendete Maskenjustierbelichter SÜSS MA 56 M für dünne Photoresistschichten ausgelegt ist und der Parallelität des Lichts eine geringere Priorität zukommt als der lateralen Auflösung [661].

Tabelle 6.2: Auswahl charakterisierter Proben aus dem Prozessstrang *Röntgen LIGA* mit Soll-Werten nach Tabellen 4.3 und 4.5 und gemessenen Ist-Werten.
Alle Werte in μm .

Name	$d_{W,\text{soll}}$	$d_{W,\text{ist}}$	$w_{M,\text{soll}}$	$w_{M,\text{ist}}$	l_{soll}	l_{ist}	$h_{M,\text{soll}}$	$h_{M,\text{ist}}$	$w_{T,\text{soll}}$	$w_{T,\text{ist}}$
FG310 R08	3	1,5	206	203-220	100	108	180	175-218	100	98
FG311 AA01	3	1,5	206	200-260	100	100	180	239-280	100	100
FG311 AA09	3	1,6	206	205-300	100	98	180	ca. 250	100	100
FG311 F02	3	1,7	206	205-260	100	102	180	ca. 170	100	100
FG311 E09	3	1,8	206	203-255	100	100	180	ca. 190	100	98
FG319 A09	3	1,8	206	197-249	100	101	180	143	100	99
FG319 F02	3	1,9	206	202-256	100	101	180	140	100	98
FG310 U10	4	2,7	300	295	100	100	180	174-206	100	97
FG310 P05	4	2,8	300	291-305	100	104	180	199-204	100	98
FG310 T09	4	2,8	300	294-306	100	105	180	163-221	100	99
FG311 AA08	4	2,8	300	300-400	100	98	180	ca. 300	100	101
FG311 Z07	4	2,8	300	290-380	100	100	180	ca. 260	100	100
FG310 R07	4	2,9	300	291-297	100	105	180	165-205	100	98
FG311 G02	4	2,9	300	295-350	100	100	180	ca. 200	100	100
FG337 N09	4	3	300	302-339	100	112	180	185	100	101
FG311 XX1	4	3,1	300	300-360	100	100	180	ca. 200	100	100
FG311 F09	4	3,1	300	290-350	100	100	180	ca. 200	100	100
FG311 L07	4	3,1	300	300-360	100	101	180	ca. 190	100	102
FG311 N09	4	3,1	300	295-360	100	100	180	ca. 200	100	100
FG334 E08	4	3,3	300	283-333	100	107	180	150	100	102
FG311 E08	4	3,5	300	293-350	100	100	180	ca. 230	100	98
FG342 F08	5	3,1	404	399-428	100	102	180	145	100	100
FG334 Z05	5	3,5	404	400-425	100	106	180	175	100	101
FG311 AA7	5	3,7	404	381-500	100	100	180	ca. 350	100	100
FG334 D06	5	3,7	404	402-436	100	110	180	161	100	101
FG310 R06	5	3,9	404	390-395	100	104	180	150-190	100	99
FG310 V10	5	3,9	404	396-399	100	94	180	157-250	100	100,5
FG311 V01	5	3,9	404	395-450	100	100	180	ca. 215	100	101
FG321 AB08	5	3,9	404	395-441	100	95	180	107	100	99
FG334 K05	5	4,5	404	396-426	100	112	180	143	100	100
FG334 E10	5	4,6	404	378-428	100	111	180	146	100	101
FG334 Y05	6	3,9	516	516-536	100	111	180	166	100	103
FG342 X03	6	3,9	516	514-540	100	102	180	153	100	102
FG342 K04	6	4,1	516	516-544	100	102	180	134	100	100
FG342 T07	6	4,1	516	514-541	100	102	180	150	100	100
FG342 W10	6	4,1	516	511-537	100	100	180	144	100	100
FG342 J03	6	4,3	516	515-544	100	102	180	144	100	100
FG342 G04	6	4,5	516	514-546	100	102	180	144	100	100
FG310 W10	6	4,9	516	498-503	100	98	180	167-258	100	98
FG311 AB07	6	4,9	516	508-750	100	100	180	ca. 400	100	100
FG342 H08	7	5,1	634	630-662	100	102	180	149	100	101
FG342 U07	7	5,1	634	629-665	100	100	180	144	100	99
FG342 T06	7	5,8	634	623-658	100	101	180	144	100	100
FG342 H07	8	6,1	756	754-776	100	101	180	160	100	100
FG342 X08	9	7,7	884	833-866	100	101	180	169	100	95

- Wegen der Aufweitung des Strahlengangs bei Abstandsbelichtung und der Streuung im Photoresist mit hohem Lösungsmittelgehalt bei der oberen Galvanoform – Ebene 5 – variiert die Strukturweite der oberen Galvanoform mit dem Abstand von der Maske.
- An der Maske findet auch Beugung statt, sodass sich vor allem bei feinen Strukturen der Maske für die untere Galvanoform – Ebene 4 – der Strahlengang mit zunehmendem Abstand von der Maske aufweitet. Dies führt zu einem breiteren vernetzten Bereich des Photoresists und damit zu schmalere metallischen Strukturen. Dieser Effekt tritt bei der Verjüngung des Stabs an seinem oberen Ende im Bereich $0,85l < z < l$ auf.
- Die Intensität der UV-Strahlung nimmt mit zunehmendem Abstand von der Maske ab (vgl. Abschnitte 5.5.1 und D.3.1), sodass die Breite der belichteten Bereiche mit zunehmendem Abstand von der Maske abnimmt. Daher ist die Masseblockbreite bei $z = d_0$ am größten.
- Die sehr langen Entwicklungszeiten führen zum Angriff der besonders lang mit dem Entwicklungsmedium in Kontakt stehenden Bereiche des Photoresists. Daher weist der Stab am oberen Ende einen größeren Durchmesser auf als vorgesehen.

Bei der Auslegung der Technologie-Demonstratoren besteht die Annahme, dass die Außenkante des Metalls und das Substrat immer den Flankenwinkel $\varphi_{\text{soll}} = 90^\circ$ einschließen. Die Messungen zeigen jedoch, dass gilt $\varphi_{\text{ist}} > 90^\circ$, siehe Abbildung 6.1 a) mit dem Flankenwinkel $\varphi_{\text{ist}} = 91,4^\circ$.

Da im Fall *UV LIGA* die Soll- und die Ist-Werte der Geometrie-Parameter voneinander abweichen, tritt ein abweichendes Übertragungsverhalten auf. Nach der Beschreibung der Ergebnisse aus den mikroskopischen Untersuchungen der *Röntgen LIGA*-Strukturen im folgenden Abschnitt, adressiert dieses Kapitel das im Experiment auftretende Übertragungsverhalten.

Röntgen LIGA

Die Technologie-Demonstratoren des Prozessstrangs *Röntgen LIGA* nach Tabelle 6.2 haben alle einen kleineren Stabdurchmesser $d_{\text{W,ist}}$ als ausgelegt. Dies ist vor allem auf Fertigungstoleranzen bei der Herstellung der Bestrahlungsmaske zurückzuführen, vgl. Abbildung 5.13. Bereits die Zwischenmaske weist um ca. $1\ \mu\text{m}$ geringere Durchmesser der Öffnungen auf. Die Breite der Masse $w_{\text{M,ist}}$ ist im Bereich der unteren Galvanoform – Ebene 4 – sehr

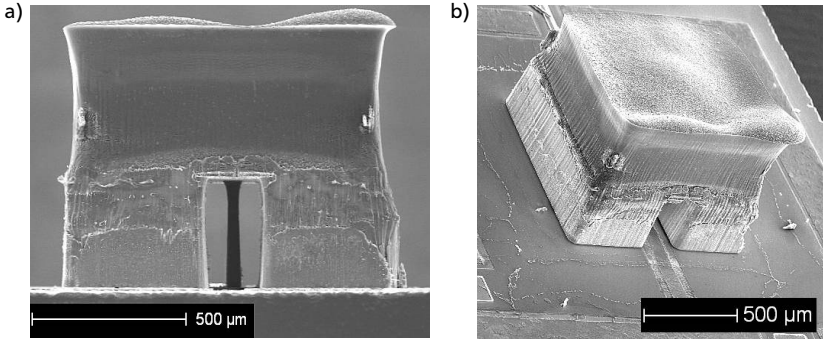


Abbildung 6.1: Technologie-Demonstrator mit der Probenbezeichnung Probe FG316 O10 aus dem Prozessstrang *UV LIGA*: a) Seitenansicht, b) schräge Draufsicht.

präzise realisiert, jedoch im Bereich der oberen Galvanoform – Ebene 5 – und darüber hinaus nicht. Die ersten Wafer sind nicht planarisiert, sodass Überwachungen zu größeren und undefinierten Masseblock-Breiten führen. Die höchste Maßhaltigkeit der oberen Galvanoform lässt sich mit Hilfe des Trockenlaminat-Photoresists SUEX realisieren (Wafer FG310). Jedoch führen bei dieser Prozesskette Haftungsprobleme der Opferschicht zu Überwachungen auf dem Substrat, vgl. Abbildung 6.2 a). Die Länge des Stabs l_{ist} ist sehr homogen und nah am ausgelegten Wert l_{soll} . Für l sind die Ergebnisse besser als im Fall *UV LIGA*, da nur ein kleinerer Bereich des Wafers genutzt wird (vgl. Abbildung 5.3) und da der Photoresist für die Schichtdicke von $100\ \mu\text{m}$ aufgeschleudert wird anstelle ihn für eine Schichtdicke von $400\ \mu\text{m}$ aufzugießen. Die Höhe der Masse $h_{\text{M,ist}}$ variiert bei den nicht planarisierten Proben stark, ist jedoch bei den planarisierten sehr gleichmäßig, vgl. Abbildung 6.2 b). Das Planarisieren ist über $h_{\text{M,soll}}$ hinaus fortgesetzt worden, um durch ein geringeres $h_{\text{M,ist}}$ als ausgelegt die Belastung der Stäbe mit dem geringeren Durchmesser $d_{\text{W,ist}}$ zu senken. Die Breite der mittleren Aussparung im Masseblock $w_{\text{T,ist}}$ liegt wegen der hohen Präzision der Röntgen-Synchrotron-Lithographie sehr nah am ausgelegten Wert $w_{\text{T,soll}}$. Im Rahmen der Messgenauigkeiten konnte keine Abweichung vom Winkel φ_{soll} festgestellt werden.

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Prozessstrang *Röntgen LIGA* sehr gut geeignet ist, um Technologie-Demonstratoren mit hoher Präzision, hohem Aspektverhältnis der Stäbe und geringen Stabdurchmessern zu fertigen. Um trotz

Fertigungstoleranzen zu funktionsfähigen Technologie-Demonstratoren zu gelangen, sollte vor allem der kritischen Wert des Stabdurchmessers $d_{w,soll}$ bei der Auslegung der Bestrahlungsmaske entsprechend variiert werden. Er sollte so variiert werden, dass trotz der Fertigungstoleranzen die angestrebte Knicksicherheit $S_{k,1g}$ erreicht werden kann.

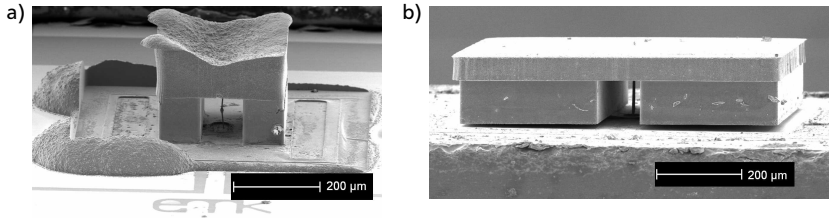


Abbildung 6.2: Technologie-Demonstratoren aus dem Prozessstrang *Röntgen LIGA* in schräger Draufsicht: a) FG310 R07 mit einem umgebenden „Wall“ auf dem Substrat durch Überwachungen, b) FG342 H07 mit homogener Masseblockhöhe h_M durch Planarisieren.

Eine Vielzahl von Proben aus dem Prozessstrang *Röntgen LIGA* weist bei den Stäben starke Verjüngungen am Fuß auf, vgl. Abbildung 6.3 a) und b) sowie Abbildung 6.3 c) und d), was häufig zum Bruch führt. Das Erscheinungsbild gleicht dem von Proben bei makroskopischen Zugversuchen, wahrscheinlich liegt also plastische Verformung durch Zugbelastung vor.

Bei Proben mit Biegestäben sehr kleinen Durchmessers, die durch die Normalbeschleunigung der zu stark überwachsenen Masseblöcke sehr stark auf Druck belastet wurden, treten die in Abbildung 6.4 dargestellten Fehlerbilder auf. Abbildung 6.4 a) zeigt einen geknickten Stab an seinem oberen Ende beim Übergang in den Masseblock. Der Übergang von dünnem Stab zu großem Masseblock erweist sich trotz der dort auftretenden höchsten mechanischen Belastung als stabil. Die Vergrößerung des Durchmessers am oberen Ende scheint also stabilisierend zu wirken. Die Verjüngung am oberen Knick zeigt eine Oberfläche wie sie bei Versetzungen mikrostrukturierter Metalle auftritt, vgl. Abschnitt 3.2.1. Die Verjüngung am unteren Knick zeigt einen Riss des Stabs. Abbildung 6.4 b) zeigt zwei Hälften eines gebrochenen Stabs, wobei die Bruchstelle schräg durch den Stab verläuft und die Oberfläche des Stabs scheinbar Spuren von Versetzungen aufweist. Diese Ergebnisse zeugen von einer Überlastung des Stabs. Sie können Hinweise für die Untersuchung der inneren Materialstruktur geben und damit letztendlich zu Aussagen über die mechanische Belastbarkeit der Stäbe führen.

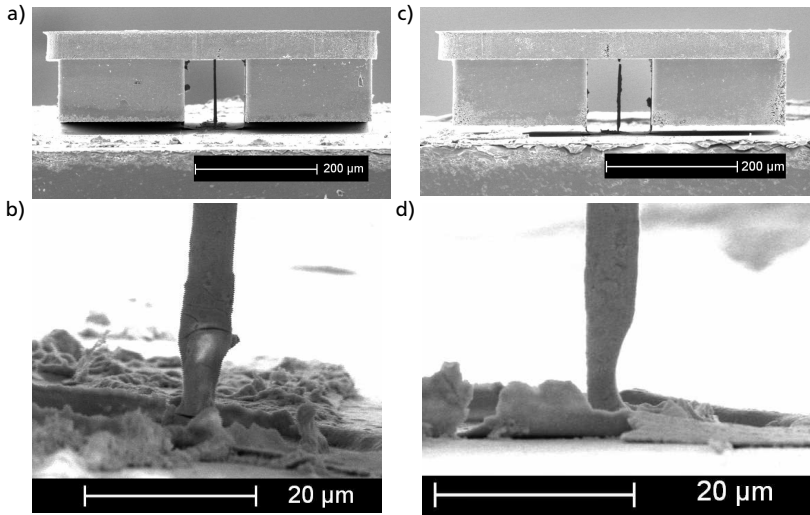


Abbildung 6.3: Defekte auf dem Wafer FG342 aus dem Prozessstrang *Röntgen LIGA*: a) Probe T07, b) Vergrößerung von T07, c) Probe W10, d) Vergrößerung von W10.

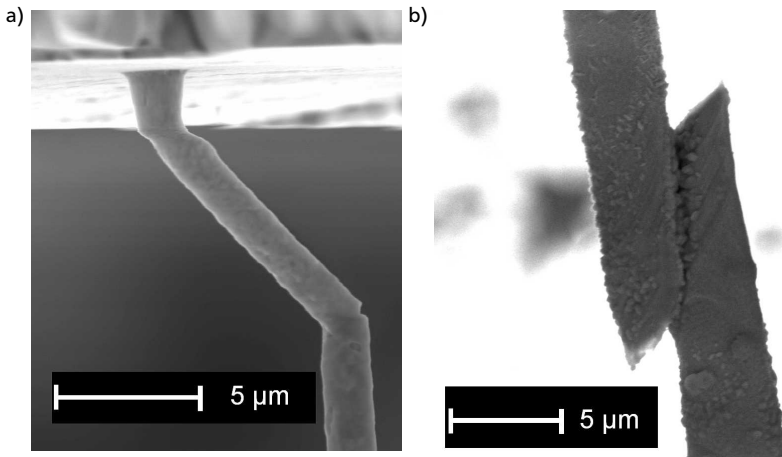


Abbildung 6.4: Defekte an Proben aus dem Prozessstrang *Röntgen LIGA*: a) Probe FG311 F02, b) Probe FG334 E10.

Eine Halbierung des Stabdurchmessers, wie sie in einigen der in Tabelle 6.2 aufgeführten Fälle eingetreten ist, führt zur Verringerung der Knicksicherheit nach (4.1) um den Faktor 16. Die auf den Masseblock wirkende Normalbeschleunigung führt dann rechnerisch noch immer zu ausreichend großen Knicksicherheiten $S_{k,lg}$ für den Betrieb der Technologie-Demonstratoren als Inertialsensoren, vgl. Abbildung 4.25 a). Einflüsse während der Fertigung, z. B. durch das Planarisieren oder durch die thermische Ausdehnung der Opferschicht beim trockenchemischen Entfernen, können offensichtlich die Stäbe deutlich stärker belasten.

6.2 Messungen des Übertragungsverhaltens

Um die Funktion des Technologie-Demonstrators als Inertialsensor nachzuweisen, sind mehrere Proben aus dem Prozessstrang *UV LIGA* nach der in Abschnitt 5.11 dargestellten Vorgehensweise zu Sensor-Demonstratoren aufgebaut worden. Das IC AD 7745 bzw. AD 7746 wird zunächst mit dem *AD7746 Evaluation Board* über USB am PC konfiguriert und ausgelesen, um alle Parameter wie z. B. Kanalwahl, Ausleserate und Offsetabgleich sowie deren Auswirkungen auf das Ausgangssignal ermitteln zu können. Anschließend kommt das batteriebetriebene *iMEMS ADXL345/ADXL346 Inertial Sensor Datalogger and Development Board* mit dem Mikrocontroller *ADuC7024* zum Einsatz. Damit können im Auslieferungszustand vom Sensor ADXL345 ermittelte Beschleunigungswerte in drei orthogonale Raumrichtungen auf einem digitalen Speichermedium aufgezeichnet werden. Die im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Hard- und Software-Erweiterungen des Aufbaus erlauben zusätzlich das gleichzeitige Aufzeichnen der Ausgangssignale vom beschriebenen Sensor-Demonstrator aus dem Kapazität-zu-Digital-Wandler-IC AD 7745 bzw. AD 7745, vgl. Abbildung 6.5. In der Abbildung ist zur elektromagnetischen Abschirmung und zum Schutz der filigranen Strukturen ein Messing-Deckel auf das Keramik-Gehäuse des Sensor-Demonstrators aufgebracht. Der Aufbau verfügt weiterhin über mechanische Anschlüsse, um statisch und dynamisch Beschleunigungen einzubringen. Die vergleichende Auswertung der Beschleunigungs- und Kapazitätswerte findet anschließend am PC statt. Dabei werden die Messdaten des Sensor-Demonstrators nach 10 min bei $a_x = 0$ zu 0 ff gesetzt, um systematische Fehler durch das Aufwärmen der Sensorelektronik zu verringern. Das weiterhin auftretende Driften des Nullpunkts von 1-2 ff/min wird ebenfalls rechnerisch kompensiert.

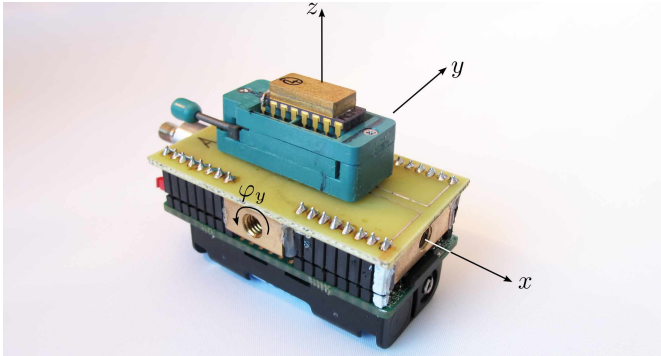


Abbildung 6.5: Aufbau zum Aufzeichnen von Beschleunigungswerten aus dem Beschleunigungssensor ADXL345 und Kapazitätswerten aus dem Kapazität-zu-Digital-Wandler-IC AD7745 bzw. AD7746 basierend auf dem iMEMS ADXL345/ADXL346 Inertial Sensor Datalogger and Development Board.

Dreht man den in Abbildung 6.5 dargestellten Aufbau in mathematisch positive Richtung um die y -Achse, wirkt auf ihn in x -Richtung (das Koordinatensystem rotiert mit) die Normalbeschleunigung g multipliziert mit dem Sinus des Drehwinkels φ_y , siehe Abbildung 6.6 a). Der Drehwinkel φ_y in den folgenden Darstellungen ist aus den vom Beschleunigungssensor ADXL345 ermittelten Messwerten durch trigonometrische Funktionen berechnet und zeigt durch die begrenzte Auflösung des Beschleunigungssensors bei $\frac{\pi}{4}$ und $\frac{3}{2}\pi$ eine geringe Auflösung des Winkels.

Für die Charakterisierung des Primärsensor-Übertragungsverhaltens $B_1 \cdot B_2$ nach Abbildung 4.3 im statischen sowie im quasi statischen Fall für bis zu 1,3 Hz kommt die Rotation im Normalbeschleunigungsfeld zum Einsatz. Abbildung 6.7 stellt beispielhaft bei Anwendung dieses Verfahrens mit der Probe FG316 F03 erzielte Messergebnisse in Bezug auf den Drehwinkel φ_y dar. Dabei ist in Abbildung 6.7 a) der Drehwinkel linear auf der Abszisse aufgetragen und in Abbildung 6.7 b) als Argument der Polardarstellung. In der Polardarstellung ist der Betrag der Kapazitätsänderung $|\Delta C|$ jeweils am Schnittpunkt von Messwerten und Strahl, der vom Koordinatenursprung ausgeht, abzulesen. Diese Darstellung verdeutlicht die hohe Symmetrie des Verhaltens für positive und negative Beschleunigungen.

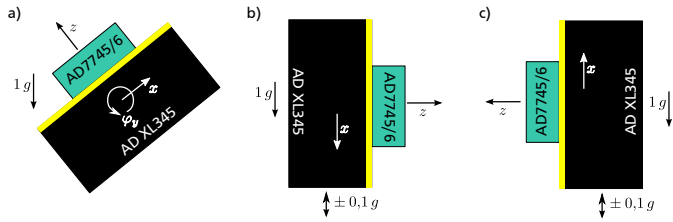


Abbildung 6.6: Verfahren zur Charakterisierung des Übertragungsverhaltens vom Sensor-Demonstrator mit dem Kapazität-zu-Digital-Wandler-IC AD 7745 bzw. AD 7746: a) Rotation im Normalbeschleunigungsfeld, b) Lineare Beschleunigung entlang der x -Achse bei Normalbeschleunigung in positive x -Richtung, c) Lineare Beschleunigung entlang der x -Achse bei Normalbeschleunigung in negative x -Richtung.

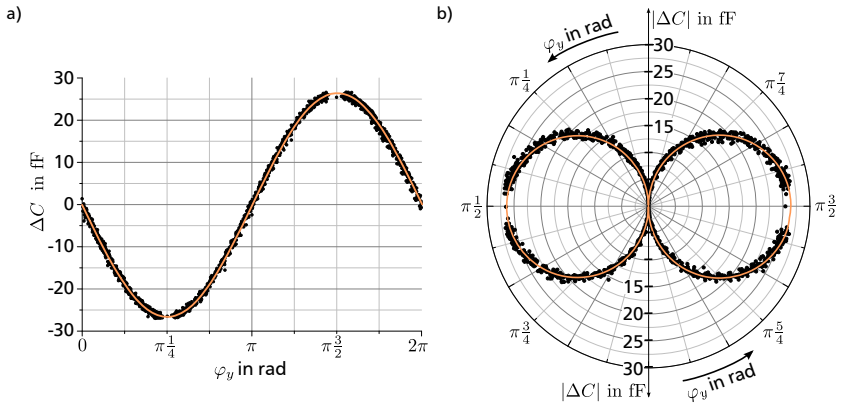


Abbildung 6.7: Messpunkte (schwarz) des Ausgangssignals vom Sensor-Demonstrator FG316 F03 aus 20 Drehungen im Normalbeschleunigungsfeld überlagert mit der Näherung (orange) nach (6.2). Der Drehwinkel φ_y ist aus den vom IC ADXL345 ermittelten Beschleunigungen in x - und in z -Richtung berechnet. a) Drehwinkel linear auf Abszisse aufgetragen, b) Drehwinkel in Polardarstellung aufgetragen.

Setzt man die Kapazitätsänderung ΔC ins Verhältnis zur Beschleunigung, vgl. Abbildung 6.8 a), ergibt sich für die Probe FG316 F03 der statische Übertragungsfaktor des Primärsensors nach Abbildung 4.3 durch die lineare Näherung über 1504 Messwerte:

$$\Delta C = a_x \cdot \underbrace{26,4588 \text{ fF/g}}_{\sigma=0,02565 \text{ fF/g}} - \underbrace{0,0713 \text{ fF}}_{\sigma=0,01779 \text{ fF}} \quad (6.1)$$

$$\Rightarrow B_1 \cdot B_2 \approx 26,46 \text{ fF/g} \quad (6.2)$$

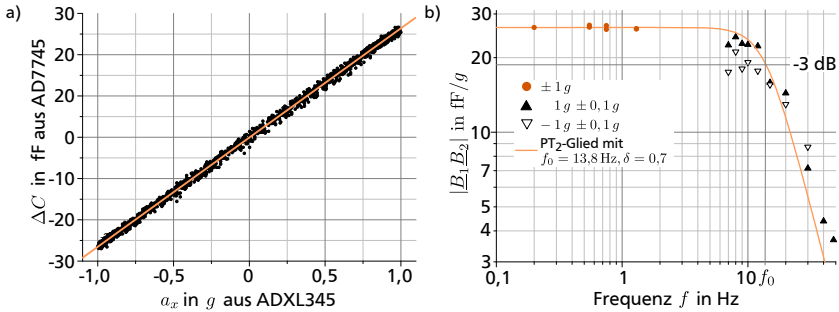


Abbildung 6.8: Ausgangssignal des Sensor-Demonstrators mit der Probe FG316 F03 bezogen auf die vom IC ADXL345 ermittelte Beschleunigung in x -Richtung: a) Messpunkte (schwarz) des statischen Verhaltens, das zur Ermittlung der Näherung (orange) nach (6.2) herangezogen wurde, b) Messpunkte des dynamischen Verhaltens und zur Orientierung skaliertes Verhalten eines PT_2 -Glieds (orange).

Der mit dem Stabdurchmesser $d_{W,soll} = 40 \mu\text{m}$ ausgelegte Technologie-Demonstrator weist für den im Experiment betrachteten Messbereich von $\pm 1 \text{ g}$ rechnerisch einen Übertragungsfaktor $B_1 \cdot B_2 = 148,3 \text{ fF/g}$ auf, vgl. Tabelle 4.4. Legt man die in den mikroskopischen Untersuchungen ermittelten Parameter nach Tabelle 6.1 der Berechnung nach Kapitel 4 zugrunde und verwendet bei Bereichsangaben jeweils den Mittelwert, ergibt sich für den Technologie-Demonstrator FG316 F03 der Übertragungsfaktor $B_1 \cdot B_2 = 56,2 \text{ fF/g}$. Der Parameter $w_{M,ist}$ variiert stark und ist im Mittel kleiner als $w_{M,soll}$. Dadurch liegt der Schwerpunkt S näher am Substrat, l_C nähert sich l an und somit ist die Hebellänge des Schwerpunkts verkürzt. Der rechnerisch geringere Übertragungsfaktor kann nur eine Näherung darstellen, da die Verwendung der Mittelwerte bei Bereichsangaben nur eingeschränkt

dem tatsächlichen Verhalten der Struktur gerecht wird. Weiterhin führt die Dünnschicht der galvanischen Startschicht – Ebene 3 – im Fußbereich des Biegestabs zum Absinken des Übertragungsfaktors, rechnerisch um ca. 10%. Messtechnisch lässt sich eine Grundkapazität $C_{0,r} = C_0/2 = 14,3 \text{ pF}$ feststellen, was im Vergleich zu Tabelle 4.4 darauf hin deutet, dass Rückstände der trockenchemisch entfernten Opferschicht zu einem gesteigerten Permittivitätszahl ϵ_r führen. Darüber hinaus können diese Rückstände für verringerte Ausschläge an den äußeren Unterkanten des Masseblocks verantwortlich sein.

Für Anregungsfrequenzen größer als 2 Hz kommt die lineare Beschleunigung des in Abbildung 6.5 dargestellten Aufbaus entlang der x -Achse zum Einsatz. Dazu ist der Aufbau auf einem elektrodynamischen Aktor montiert, der die Beschleunigung von $\pm 0,1 \text{ g}$ zusätzlich zur Normalbeschleunigung von je nach Montagerichtung 1 g (siehe Abbildung 6.6 b) bzw. -1 g (siehe Abbildung 6.6 c) einbringt. Durch Begrenzung des Aktorhubs und der Aktorleistung ist die minimale Anregungsfrequenz auf 7 Hz limitiert.

Abbildung 6.8 b) stellt die Ergebnisse zur Ermittlung des dynamischen Übertragungsverhaltens in Abhängigkeit der Anregungsfrequenzen dar. Die Datenpunkte bis zu 1,3 Hz stammen von der Rotation im Normalbeschleunigungsfeld, die Datenpunkte ab 7 Hz von der linearen Beschleunigung mit Hilfe des elektrodynamischen Aktors. Bei beiden Messverfahren findet für 1 min eine konstante Anregung statt und bei der Datenauswertung werden die Spitze-Spitze-Werte der Kapazitätsänderung und der Beschleunigung in Relation gesetzt. Die Einstellungen des Kapazität-zu-Digital-Wandler-IC zur Wandlung der Kapazitätsänderung ΔC in ein digitales Ausgangssignal – entsprechend \underline{B}_3 in der Wandlerkette nach Abbildung 4.8 – weisen eine -3 dB -Grenzfrequenz von 13,8 Hz aus. Diese Einstellung wurde gewählt, da sie die größte Rauschunterdrückung bei 50 Hz bietet. Erwartungsgemäß fällt der Übertragungsfaktor bei dieser Frequenz auf ca. 70% des Ausgangswerts ab. Zur Orientierung ist daher in Abbildung 6.8 b) das Verhalten eines auf den statischen Übertragungsfaktor skalierten PT_2 -Glieds mit der Resonanzfrequenz $f_0 = 13,8 \text{ Hz}$ bzw. $\omega_0 = 2,196 \frac{1}{\text{s}}$ und der Dämpfung $\delta = 0,7$ angegeben.

Die Einstellungen des Beschleunigungssensors ADXL345 weisen eine -3 dB -Grenzfrequenz von 200 Hz aus. Daher ist im messtechnisch betrachteten Frequenzbereich von einem konstanten Übertragungsfaktor für die Ermittlung der Referenzbeschleunigung a_x bzw. des Drehwinkels φ_y auszugehen. Der mit dem Stabdurchmesser $d_{\text{W,soll}} = 40 \mu\text{m}$ ausgelegte Technologie-

Demonstrator weist für die zur Messung relevante rotatorische Bewegung und den Messbereich von $\pm 10\text{ g}$ eine Resonanzfrequenz von $\frac{\omega_{\text{rot},0y}}{2\pi} = 138,9\text{ Hz}$ auf, vgl. Tabelle 4.4. Legt man die Messwerte nach Tabelle 6.1 der Berechnung nach Kapitel 4 zugrunde und verwendet bei Bereichsangaben jeweils den Mittelwert, ergibt sich rechnerisch eine Resonanzfrequenz der rotatorischen Bewegung von $\frac{\omega_{\text{rot},0y}}{2\pi} = 41,2\text{ Hz}$ und bei viskoser Dämpfung eine Güte von $Q_{\text{rot},y,\text{visk}} = 0,71$. Die gemessene Frequenzabhängigkeit der Übertragungsfunktion stellt also im Wesentlichen das Verhalten des Kapazität-zu-Digital-Wandler-IC dar, das die Dynamik des Sensor-Demonstrators begrenzt.

Mit den in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnissen ist es erstmals gelungen, die Funktion des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes für den Aufbau von Inertialsensoren nachzuweisen. Es konnte gezeigt werden, dass das Mikrosystem mit dem senkrecht stehenden Biegestab als einzigem Feder-element ein Verhalten wie theoretisch beschrieben aufweist. Damit ist erfolgreich nachgewiesen, dass durch Vor-Ort-Synthese vertikal integrierte Federelemente geeignet sind, um metallische Mikrosysteme mit sensorischen Eigenschaften aufzubauen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt erstmals die Verwendung aus der Ebene heraus stehender, langer und dünner vor Ort abgeschiedener Metallstäbe als integrierte mikromechanisch federnde Bauelemente. Motivation für diese Arbeit ist das Miniaturisierungspotential, das vom Einsatz von Nanodrähten für diese Funktion ausgeht. Beispielhaft zeigt Abbildung 7.1 zwei in dieser Arbeit gefertigte Metallstäbe mit Überwachungen an den oberen Enden. Die Struktur in Abbildung 7.1 a) wurde mit dem Prozessstrang *UV LIGA* nach Abbildung 5.2 hergestellt, die Struktur in Abbildung 7.1 b) mit Ionenstrahl-Lithographie und galvanischer Abscheidung nach Abbildung 2.8. Letztere Struktur schöpft das Miniaturisierungspotential der Ionenstrahl-Lithographie noch nicht aus, denn hier sind Stabdurchmesser im Nanomaßstab möglich.

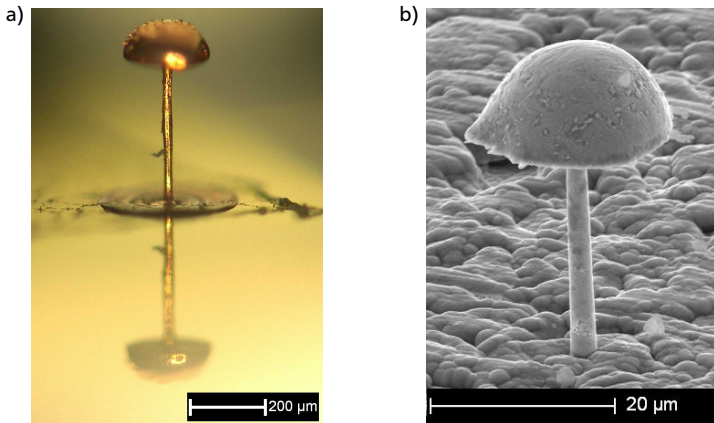


Abbildung 7.1: Metallstäbe mit Überwachungen an den oberen Enden: a) Kupfer-Struktur aus dem Prozessstrang *UV LIGA*, b) Gold-Struktur, die mit Hilfe von Ionenstrahl-Lithographie und galvanischer Abscheidung (*IT LIGA*) hergestellt wurde.

7.1 Zusammenfassung

Im Vordergrund dieser Arbeit steht die Technologieentwicklung für die integrierte Fertigung federnder Metallstäbe in Mikrosystemen. In Kapitel 2 sind Verfahren zur Herstellung solcher Mikrosysteme und deren Anwendungen vorgestellt. Kapitel 3 beschreibt Möglichkeiten zum Aufbau von Inertialsensoren auf Basis flexibler miniaturisierter Stäbe und Kapitel 4 geht auf deren Auslegung vor dem Hintergrund technologischer Randbedingungen ein. Kapitel 5 beschreibt detailliert die entwickelten und verwendeten Fertigungsverfahren und Kapitel 6 die Eigenschaften der damit aufgebauten Technologie-Demonstratoren.

In dieser Arbeit kommen Verfahren zur integrierten Fertigung metallischer Stäbe mit Durchmessern $d_{\text{Wist}} > 1 \mu\text{m}$ zur Anwendung. Bei Durchmessern im Nanomaßstab wäre das Miniaturisierungspotential für Mikrosysteme deutlich höher, jedoch sind für die voll integrierte Fertigung von Nanostäben in Mikrosystemen noch viele prozesstechnische Fragestellungen zu untersuchen. Diese werden aktuell im Rahmen von Forschungsprojekten am Institut EMK untersucht, die im Zusammenhang mit den hier vorgestellten Untersuchungen initiiert wurden [68, 69, 295].

Insgesamt haben im Rahmen dieser Arbeit (studentische Arbeiten ausgenommen) mehr als 250 Wafer mehrstufige Prozessketten im Reinraumlabor des Institut EMK durchlaufen, ein Großteil davon zur Untersuchung der Strukturierbarkeit sehr dicker Photoresiste mit hohem Aspektverhältnis sowie der anschließenden galvanischen Abscheidung. Durch die Verschiebung von Parameterfenstern bei der Kombination mehrerer Prozessketten steigen Aufwand und Prozessrisiko mit zunehmender Anzahl der Prozessschritte erheblich an. Die Bearbeitungszeit zur vollständigen Durchführung der Prozessketten nach Kapitel 5 liegt für *UV LIGA* mit 79 Prozessschritten im regulären Laborbetrieb bei ca. 3-4 Wochen, für den Prozessstrang *Röntgen LIGA* mit 78 Prozessschritten durch die Verfügbarkeit der Bestrahlungseinrichtung bei 2-3 Monaten. Für *UV LIGA* konnten 9 Wafer die komplette Prozesskette durchlaufen und jeweils in 197 Chips mit der Fläche $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ vereinzelt werden, für *Röntgen LIGA* konnten 5 Wafer die komplette Prozesskette durchlaufen und jeweils in 272 Chips mit der Fläche $1,7 \text{ mm} \times 1,7 \text{ mm}$ vereinzelt werden. Damit standen am Ende der Arbeiten zur Fertigung eine große Menge hoch empfindlicher Technologie-Demonstratoren zur Verfügung, die im Fall *UV LIGA* zum Aufbau von Sensor-Demonstratoren dienen konnten.

Ohne die im Zusammenhang mit der hier diskutierten Forschungstätigkeit initiierte Neuanschaffung und damit verbunden in Forschungsprojekten untersuchte Remote-Plasma-Anlage STP2020 wäre die Durchführung der Arbeit nicht möglich gewesen. Ebenso hat erst die Förderung im Rahmen der Karlsruhe Nano Micro Facility (KNMF 2010-004-000365 und 2012-008-000970, www.knmf.kit.edu) – einer Helmholtz-Forschungseinrichtung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT, www.kit.edu) – die Verwendung der Röntgen-Synchrotron-Lithographie ermöglicht.

Der neuartige Ansatz für den Aufbau von Inertialsensoren sowie die Fortschritte im Bereich der Prozesstechnologie konnten auf mehreren internationalen Fachtagungen vorgestellt und diskutiert werden. Darüber hinaus sind die in mehreren internationalen Fachzeitschriften publizierten Ergebnisse für deren herausragende Qualität ausgezeichnet worden. Für die Verwendung der senkrecht stehenden, langen und dünnen Stäbe in metallischen Mikrosystemen konnten mehrere Patentanmeldungen und eine Patenterteilung erzielt werden. Die in dieser Arbeit erstmals gezeigten messtechnischen Untersuchungen der Technologie-Demonstratoren mit vertikal integrierten Federelementen weisen die Funktion des Mikrosystems im Einklang mit der analytischen Beschreibung nach.

7.2 Ausblick

Direkt an diese Arbeit anschließen sollte sich die Untersuchung weiterer Technologie-Demonstratoren unter Verwendung von Auswerteelektronik mit höherer Grenzfrequenz, um das dynamische Verhalten der mikro-mechanischen Struktur detaillierter untersuchen zu können, vgl. z. B. Abschnitt D.4.1 dieser Arbeit mit [498] Abschnitt 1c. Ebenso sollten die verbleibenden Proben des Prozessesstrangs *Röntgen LIGA* genutzt werden, um auch hier funktionsfähige Sensor-Demonstratoren aufzubauen. Darüber hinaus kann die Variation der Kontaktschicht-Struktur vor allem bei *UV LIGA* genutzt werden, um Drehratensensor-Demonstratoren mit elektrostatischem Antrieb aufzubauen. Wird die Form der Kontaktschicht variiert, sollte für eine zuverlässige elektrische Verbindung der Auswerteelektronik auch die Auswahl des Kontaktschichtmaterials überdacht werden, da die Diffusion von Kupfer in die Lötverbindung deren Alterungsverhalten beeinflusst. Von speziellem Interesse für die hier untersuchten Technologie-Demonstratoren aber auch von generellem technologischen Interesse für

Überwachungen auf Galvanoformen am oberen Ende der Metallstäbe ist die Verhinderung von Lunkerbildung durch das Aufbringen strukturierter Dünnschichten [662]. Außerdem bietet es sich an, in weiteren Forschungsarbeiten die Realisierung der in [2] und [4] vorgestellten Mikrospiegelbauteile mit den in Kapitel 2 und 5 vorgestellten Verfahren zu zeigen.

Im weiter gefassten Rahmen der Mikro-Nano-Integration sind parallel zu dieser Arbeit am Institut EMK bedeutende Fortschritte zur integrierten Fertigung von Nanostäben gelungen. Nun gilt es, die Zuverlässigkeit der Fertigungsverfahren und der damit hergestellten Mikrosysteme zu untersuchen und zu steigern, vgl. Fehlstellen in den Abbildungen 6.4 und 7.2 sowie [663]. Aus dem damit verbundenen Verhalten können auch Vorteile erwachsen wie z. B. eine gezielt stattfindende plastische Verformung, die den Bruch der Metallstäbe verhindert. Vor allem an den skalenübergreifenden Übergängen der Stäbe treten Fragestellungen der äußeren Formgebung und der inneren Struktur der Materialien zu Tage, die mit zunehmender Miniaturisierung bedeutender werden, vgl. Abbildungen 6.3. Durch die Aufweitung des Stabdurchmessers an dessen Ende lassen sich Kerbspannungen minimieren und das Materialverhalten kann bei Stabdurchmessern im Nanomaßstab ohne abrupten Wechsel zum Volumen-Material-Verhalten wechseln. Das Alterungsverhalten dieser stark beanspruchten Bereiche ist für die Anwendung entscheidend und dazu sind Grundlagenuntersuchungen und Prozessentwicklungen gleichermaßen notwendig.

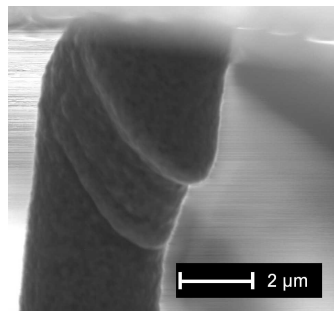


Abbildung 7.2: Fehlstelle der stark auf Druck belasteten Probe FG311 V10.

Direkte Auswirkungen der Miniaturisierung von Metallstäben sind die Verringerung der Bauteilgröße, die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche und bei Durchmessern im Nanomaßstab die Beeinflussung der inneren Materialstruktur durch die äußere Formgebung, vgl. Abschnitt 3.2.1 und ins-

besondere Abbildung 3.7. Darüber hinaus führt die Verringerung des Stabdurchmessers mit der einhergehenden Vergrößerung des Aspektverhältnisses auch dazu, dass die Stäbe hinsichtlich spezifischer Zuglast sowie hinsichtlich Biegebelastung stabiler werden, vgl. Abschnitte 4.1.2 und 4.1.3. Dies erklärt sich, wenn man den Biegeradius ins Verhältnis zum Radius des Biegestabs setzt. Nun gilt es, die Beeinflussung der inneren Materialstruktur im Integrationsprozess systematisch einzustellen, um sie im Mikrosystem gezielt nutzen zu können.

Mit dieser Arbeit sind wichtige Grundsteine für die Mikro-Nano-Integration dünner metallischer Stäbe gelegt worden. Das verwendete Verfahren der galvanischen Vor-Ort-Abscheidung erlaubt den Aufbau der Mikrosysteme bei geringen Prozesstemperaturen und ist durch die Auslegung auf planare Substrate für die Massenfertigung skalierbar. Mit sinkenden Stabdurchmessern und Stablängen bei gleichzeitig hohem Aspektverhältnis kann auch die Prozesszeit zur Abscheidung drastisch sinken. Somit ist eine Basis geschaffen, um neuartige und günstige Mikrosysteme mit miniaturisierten, vertikal integrierten Metallstäben zu schaffen.



Literaturverzeichnis

Eigene Erfindungen

- [1] M. STAAB, H. F. SCHLAAK, F. GREINER, M. RAUBER, W. ENSINGER, H. TEMPEL und J. J. SCHNEIDER. „Energieversorgungsvorrichtung“. Erfindungsmeldung (Darmstadt). 2013.
- [2] F. GREINER, H. F. SCHLAAK, S. QUEDNAU und M. STAAB. „Mikrospiegelbauteil mit linienförmiger Biegefeder sowie Verfahren zu dessen Herstellung“. DE102011104843(B4). 02/2013.
- [3] T. MEISS, R. WERTHSCHÜTZKY, J. RAUSCH, F. GREINER und T. ROSSNER. „Sensor mit einfacher Verbindungstechnik“. Patentanmeldung eingereicht. 2013.
- [4] F. GREINER, H. F. SCHLAAK, S. QUEDNAU und M. STAAB. „Mikrospiegelbauteil, Mikrospiegelvorrichtung mit wenigstens einem Mikrospiegelbauteil sowie Verfahren zur Herstellung eines Mikrospiegelbauteils“. DE102011104843(A1). 11/2012.

Eigene Veröffentlichungen

- [5] F. GREINER, M. GUTTMANN, P. MEYER und H. F. SCHLAAK. „Fabrication of 3D-MEMS with High Aspect Ratio Micro Wires“. In: *Book of Abstracts on 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology HARMNST 2013*. Berlin, 04/2013, S. 19–20.
- [6] F. GREINER, F. DASSINGER, S. QUEDNAU, R. SARWAR, M. HOTTES, C. STEGMANN, M. RAUBER, C. TRAUTMANN, H. F. SCHLAAK und W. ENSINGER. „Integration of nanowires onto 100 mm wafers by the growth in-place method“. In: *GSI Scientific Report 2012*. Darmstadt, 05/2013.
- [7] F. GREINER, S. QUEDNAU, F. DASSINGER, R. SARWAR, H. F. SCHLAAK, M. GUTTMANN und P. MEYER. „Fabrication techniques for multiscale 3D-MEMS with vertical metal micro- and nanowire integration“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23.2 (02/2013), S. 025018. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/23/2/025018.
- [8] F. GREINER und H. SCHLAAK. „High aspect ratio metal micro and nano pillars for minimal footprint MEMS suspension“. In: *Microsystem Technologies* 19.3 (03/2013), S. 425–431. ISSN: 0946-7076. DOI: 10.1007/s00542-012-1659-x.
- [9] *Institutsbericht 2011/2012 - Institut für Elektromechanische Konstruktionen*. Techn. Ber. Darmstadt, 2012, S. 20–37. URL: <http://www.emk.tu-darmstadt.de/index.php?id=1394>.

-
- [10] F. DASSINGER, S. QUEDNAU, F. GREINER, H. F. SCHLAAK, M. HOTTES, C. STEGMANN, W. ENSINGER und C. TRAUTMANN. „Einsatz von integrierten Nanostrukturen in Mikrosystemen - Application of integrated nano structures in micro systems“. In: 4. GMM-Workshop 12.-13. November 2012 in Berlin - GMM Fachbericht Mikro-Nano-Integration. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 11/2012. ISBN: 978-3-8007-3473-3.
 - [11] F. DASSINGER, M. HOTTES, F. GREINER, H. F. SCHLAAK, W. ENSINGER und G. TSCHULENA. „Mikro-Nano-Integration für die Inertialsensorik“. In: *Sensor Magazin* 27.3 (09/2012), S. 24.
 - [12] F. GREINER, H. F. SCHLAAK, P. MEYER und M. GUTTMANN. „Out of Plane High Aspect Ratio Micro Wires as Suspension Elements in Inertial Sensors“. In: *Abstract Book 4th ANKA/KNMF Users' Meeting*. Karlsruhe, 10/2012, S. 111–112.
 - [13] F. GREINER. „Metallic Micro Nailheads MAde by LiG process - MiNiMAL“. In: *KNMF Annual Report 2011*. Karlsruhe, 10/2012, S. 154–158.
 - [14] F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „MEMS Made in a Small Scale Research Lab - Opportunities for Functional Targets“. In: *Book of Abstracts on 4th International Target Fabrication Workshop*. Mainz, 08/2012, S. 69.
 - [15] F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „Cleanroom Laboratory for Micro- and Nanotechnology“. In: *Book of Abstracts on 4th International Target Fabrication Workshop*. Mainz, 08/2012, S. 100.
 - [16] T. WINTERSTEIN, F. GREINER, H. SCHLAAK und L. PULLICH. „A blended-learning concept for basic lectures in electrical engineering: A practical report“. In: *2012 International Conference on Education and e-Learning Innovations (ICEELI)*. Sousse, Tunesien, 07/2012, S. 1–4. DOI: 10.1109/ICEELI.2012.6360578.
 - [17] H. F. SCHLAAK, F. GREINER und J. J. SCHNEIDER. „Micro Nano Integration - Nano enhanced Microsystems“. In: *Microsystems Technology in Germany 2012* (03/2012), S. 32–33. ISSN: 2191-7183.
 - [18] F. GREINER, H. HAUS, S. QUEDNAU, H. F. SCHLAAK, M. STAAB und T. WINTERSTEIN. *Integrationsorientierte Verfahren zur Herstellung hybrider Mikrosysteme INSIGHT, FKZ 16SV5053*. BMBF Schlussbericht. 2012. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV5053>.
 - [19] F. GREINER, J. EBERHARDT und H. F. SCHLAAK. „Senkrechte metallische Nano- und Mikrodrähte mit hohem Aspektverhältnis als neuartige Federelemente in Mikrosystemen - Vertical High Aspect Ratio Nano and Micro Wires as Novel Suspension Elements in MEMS“. In: *Proceedings of the Mikrosystemtechnik Kongress 2011*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 10/2011, S. 328–331. ISBN: 978-3-8007-3367-5.
 - [20] P. F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „High Aspect Ratio Metal Nano and Micro Pillars as Suspension Elements in MEMS“. In: *9th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology*. HsinChu, Taiwan, 06/2011, S. 53–54.
 - [21] M. STAAB, F. GREINER, M. SCHLOSSER und H. F. SCHLAAK. „Applications of Novel High-Aspect-Ratio Ultrathick UV Photoresist for Microelectroplating“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 20.4 (08/2011), S. 794–796. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2011.2159098.

-
- [22] J. GAO, F. GREINER, T. WEILAND, H. F. SCHLAAK, W. F. O. MÜLLER und D. EICHER. „Combined Simulation of a Micro Permanent Magnetic Linear Contactless Displacement“. In: *Proceedings of the Mikrosystemtechnik Kongress 2011*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 10/2011, S. 813–816. ISBN: 978-3-8007-3367-5.
- [23] J. GAO, W. F. MÜLLER, F. GREINER, D. EICHER, T. WEILAND und H. F. SCHLAAK. „Combined Simulation of a Micro Permanent Magnetic Linear Contactless Displacement Sensor“. In: *Sensors* 10.9 (09/2010), S. 8424–8436. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s100908424.
- [24] P. F. GREINER, J. EBERHARDT und H. F. SCHLAAK. „Metallic Micro Nails MADE by direct LiG process - MiNiMAL“. In: *Abstract Book 2nd ANKA/KNMF Joint Users Meeting*. Karlsruhe, 10/2010, S. 69–70.
- [25] S. QUEDNAU, F. GREINER, H. F. SCHLAAK, M. RAUBER, R. NEUMANN und W. ENSINGER. „Integration von Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasflusssensorik - Integration and Application of Nanowire Arrays in Microsystems for Gasflow Sensors“. In: *Proc. 2nd Workshop Mikro-Nano-Integration (GMM-FB 63)*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2010, S. 159–164. ISBN: 978-3-8007-3216-6.
- [26] *Institutsbericht 2009/2010 - Institut für Elektromechanische Konstruktionen*. Techn. Ber. Darmstadt, 2010, S. 28–29. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/2578>.
- [27] H. F. SCHLAAK und F. GREINER. „Mikro-Nano-Integration - Neue Funktionen für Mikrosysteme durch Nanotechnologie - Micro-Nano-Integration - Nanotechnology for new Functions in Microsystems“. In: *Proc. 1st Workshop Mikro-Nano-Integration (GMM-FB 63)*. Berlin, Offenbach, 2009, S. 129–134. ISBN: 978-3-8007-3155-8.
- [28] F. GREINER, H. F. SCHLAAK und A. BRACHT. „Mikro-Nano-Integration - Brücke in die Nanowelt“. In: *Mikroproduktion* 7.5 (2009), S. 27–29. ISSN: 1614-4538.
- [29] F. GREINER, H. F. SCHLAAK, G. TSCHULENA und W. KORB. *Mikro-Nano-Integration - Einsatz von Nanotechnologie in der Mikrosystemtechnik*. Bd. 13. Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Wiesbaden: Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 2009.
- [30] J. GAO, W. F. O. MÜLLER, F. GREINER, D. EICHER, T. WEILAND und H. F. SCHLAAK. „Combined simulation of micro permanent magnetic linear contactless displacement sensor“. In: *Book of digests, ISEF 09, ARRAS (France)*. 2009, 211–212. DOI: 10.3390/s100908424.
- [31] H. F. SCHLAAK, R. RIEDEL, F. VÖLKLEIN, R. NEUMANN, W. KORB, F. GREINER, E. IONESCU und M. RAUBER. *Integration und Anwendung von Nano-Drähten durch Mikro-Nano-Fertigung und Mikro-Montage - INANOMIK, FKZ 16SV3555*. BMBF Schlussbericht. 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3555>.
- [32] E. IONESCU, F. GREINER, R. G. NGOUMENI YAPPI, S. MARTINEZ-CRESPIERA, H. F. SCHLAAK und R. RIEDEL. „Thermally Conductive SU-8-Composites using Ceramic Nano-Powders“. In: *Conference Proceeding Nanofair 2008 (2008)*, S. 205–208.

-
-
- [33] *Institutsbericht 2007/2008 - Institut für Elektromechanische Konstruktionen.* Techn. Ber. Darmstadt, 2008, S. 31–34. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/2130>.
 - [34] R. G. BALLAS, P. F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators in Closed Form Analysis“. In: *Actuator 2006 : 10th International Conference on New Actuators & 4th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems*. Bremen: HVG, 06/2006.
 - [35] F. GREINER. *DA1596 - Optimierung des Anschlagverhaltens von piezoelektrischen Aktoren*. Diplomarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 04/2006.
 - [36] R. G. BALLAS, P. F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „Non-contact deflection measurements of piezoelectric beam bending actuators with an integrated inductive sensor in combination with a high-accuracy electronic circuit“. In: *Mikro-System-Technik Chemnitz '05 : Mikromechanik & Mikroelektronik*, Chemnitz: Techn. Univ., 10/2005.
 - [37] R. G. BALLAS, P. F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „Smart piezoelectric bending micro actuator: an integrated inductive non-contact proximity sensor to detect tip deflection“. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2005*. Freiburg: VDE-Verl., 10/2005. ISBN: 978-3-8007-2926-5.
 - [38] R. G. BALLAS, P. F. GREINER und H. F. SCHLAAK. „Deflection measurement of piezoelectric bending actuators with a combination of an integrated non-contact inductive sensor and high-accuracy electronic circuit“. In: *Mechanical engineering from macro to nano : 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*. Ilmenau: ISLE, 09/2005.
 - [39] R. G. BALLAS, P. F. GREINER, H. F. SCHLAAK und A. J. SCHMID. „Bending Actuators with Integrated Capacitive and Inductive Sensors for Deflection Measurement“. In: *7. GMA-Kongress 2005 - Automation als interdisziplinäre Herausforderung*. Baden-Baden: VDI Verlag, 06/2005.
 - [40] R. G. BALLAS, P. F. GREINER, H. F. SCHLAAK und A. J. SCHMID. „Piezoelektrische Biegeaktoren mit integrierter kapazitiver und induktiver Sensorik zur Erfassung der Auslenkung“. In: *Automation als interdisziplinäre Herausforderung - GMA-Kongress 2005*. Baden-Baden: VDI-Verl., Düsseldorf, 06/2005. ISBN: 3-18-091883.
 - [41] F. GREINER. *SA1553 - Neuer integrierter Näherungssensor*. Studienarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK und EPF Lausanne, Section Microtechnique, 09/2004.

Betreute studentische Arbeiten

- [42] Y. YANG. *DA1775 - Optimierung und Charakterisierung eines Mikrodraht-basierten UV-LiG-MEMS für die Inertialsensorik*. Diplomarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 11/2011.
- [43] M. EL KHOURY. *BA1774 - Mikro-Galvanoformung mit heterogenem Aspektverhältnis für Inertialsensoren*. Bachelorarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 08/2011.

-
- [44] C. NAKIC. *SA1773 - Prozess zur Integration metallischer Mikro- und Nanodrähte für magnetoresistive Inertialsensoren*. Studienarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 12/2011.
- [45] D. JUNG und F. J. GUERRIER. *MSTII - Hochminiaturisierte elektrostatisch / kapazitive Mehrachs-Inertialsensoren*. Seminarbeitrag. TU Darmstadt, Institut EMK, 06/2011.
- [46] L. N. NGUYEN. *MA1757 - Mikrostrukturen für die Integration von Nanodrahtarrays in MEMS*. Masterarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 04/2011.
- [47] J. EBERHARDT. *DA1741 - Entwurf und Aufbau von Beschleunigungssensoren mit Mikro-Nailhead-Strukturen*. Diplomarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 09/2010.
- [48] S. QUEDNAU. *DA1721 - Integration und Einsatz metallischer Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasfluss-Sensorik*. Diplomarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 02/2010.
- [49] A. TOTZAUER, Y. WANG, T. WINTERSTEIN und O. YAPICI. *PEMIII - Entwicklung von Mikrogreifern mit elektrothermischen Aktoren*. Projektseminar. TU Darmstadt, Institut EMK, 01/2008.
- [50] T. BRAUERS. *DA1681 - Flache Vorsteuerung eines Biegebalkens mittels Piezoaktoren*. Diplomarbeit. TU Darmstadt, Institute EMK und rtm, 09/2007.
- [51] J. EBERHARDT, M. MANDERSCHIED, Y. WANG und N. WOLF. *PEMII - Elektrodenherstellung aus leitfähigen Suspensionen*. Projektseminar. TU Darmstadt, Institut EMK, 07/2007.
- [52] S. SCHMIDT. *SA1636 - Prozessentwicklung zur Herstellung elektrothermischer Mikroaktoren*. Studienarbeit. TU Darmstadt, Institut EMK, 06/2007.

Referenzierte Literatur

- [53] G. GERLACH und W. DÖTZEL. *Einführung in die Mikrosystemtechnik: ein Kursbuch für Studierende*. Hanser Verlag, 2006.
- [54] *Nanotechnologien - Fachwörterverzeichnis - Teil 1: Kernbegriffe (ISO/TS 80004-1:2010)*. ST, VN. 02/2012.
- [55] *Nanotechnologien - Terminologie und Begriffe für Nanoobjekte - Nanopartikel, Nanofaser und Nanoplättchen (ISO/TS 27687:2008); Deutsche Fassung CEN ISO/TS 27687:2009*. ST, VN. 02/2010.
- [56] *Nanotechnologien - Fachwörterverzeichnis - Teil 3: Kohlenstoff-Nanoobjekte (ISO/TS 80004-3:2010)*. ST, VN. 02/2011.
- [57] *Nanotechnologien - Fachwörterverzeichnis - Teil 4: Nanostrukturierte Materialien (ISO/TS 80004-4:2011-12)*. DC, VN-E. 12/2011.
- [58] *Nanotechnologien - Fachwörterverzeichnis - Teil 5: Nano/Bio-Grenzfläche (ISO/TS 80004-5:2011-12)*. DC, VN-E. 09/2010.
- [59] *Nanotechnologies - Vocabulary - Part 6: Nanoscale measurements and instrumentation (ISO/TS 80004-6)*. Techn. Ber.
- [60] *Nanotechnologien - Fachwörterverzeichnis - Teil 7: Diagnostik und Therapeutik (ISO/TS 80004-7:2011-10)*. ST, VN. 10/2011.
- [61] *Nanotechnologies - Vocabulary - Part 8: Nanomanufacturing processes (ISO/TS 80004-8)*. Techn. Ber.
- [62] *Nanotechnologies - Vocabulary - Part 9: Electrotechnical products and systems (ISO/TS 80004-9)*. Techn. Ber.
- [63] *Nanotechnologies - Vocabulary - Part 10 - Photonic components and systems (ISO/TS 80004-10)*. Techn. Ber.
- [64] *Standard in development: PD ISO/TR 14786 Nanotechnologies - Framework for nomenclature models for nano-objets*. Techn. Ber. URL: <http://standardsdevelopment.bsigroup.com/Home/Project/201002855> (besucht am 30.01.2012).
- [65] K. BLIND. *NanoNormung - Normung im Bereich der Nanotechnologien als Chance für hessische Unternehmen*. Schriftenreihe der Aktionslinie Hessen-Nanotech des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung 8. 2007.
- [66] W. BERGHOLZ und F. NORBERT. „Performance Standards“. en. In: *Nanotechnology Standards*. Springer, 01/2011, S. 89–116. ISBN: 978-1-4419-7852-3.
- [67] E. F. REZNIKOVA, J. MOHR und H. HEIN. „Deep photo-lithography characterization of SU-8 resist layers“. In: *Microsystem Technologies* 11.4 (2005), 282–291. ISSN: 0946-7076.
- [68] S. QUEDNAU, H. F. SCHLAAK, C. STEGMANN und W. ENSINGER. *3-Dimensionale Mikro-Nano-Integration für die Gasflusssensorik - 3-DOING, FKZ 16SV5476*. Berlin, 06/2012. URL: <http://www.vdivde-it.de/anmeldung/mni-mag-2012/vortraege>.

-
- [69] J. J. SCHNEIDER, H. F. SCHLAACK, D. PAVLIDIS, F. KÜPPERS und W. ENSINGER. *Elektromechanische Sensoren mit eindimensionalen Nanoobjekten - ELEMENT*, FKZ 16SV5475. Berlin, 06/2012. URL: <http://www.vdivde-it.de/anmeldung/mni-mag-2012/vortraege>.
- [70] J. HOERNI. *Method of manufacturing semiconductor devices*. US Patent 3,025,589. 03/1962.
- [71] ITRS. *International Technology Roadmap for Semiconductors 2011 Edition - Lithography*. 2011. URL: <http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm> (besucht am 13. 01. 2012).
- [72] O. N. TUFT, P. W. CHAPMAN und D. LONG. „Silicon Diffused-Element Piezoresistive Diaphragms“. English. In: *Journal of Applied Physics* 33.11 (11/1962), S. 3322–3327. ISSN: 0021-8979. DOI: 10.1063/1.1931164.
- [73] ITRS. *International Technology Roadmap for Semiconductors 2011 Edition - Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)*. 2011. URL: <http://www.itrs.net/home.html> (besucht am 13. 01. 2012).
- [74] P. COSKINA. „Mikro-Nano-Integration für die Mikrosystemtechnik“. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2007*. Berlin-Offenbach: VDE, 10/2007.
- [75] J. DECKER. *ISO/TC 229 - Documentary Standards for Nanotechnology*. Gaithersburg, Maryland, USA, 02/2008.
- [76] P. HATTO. *ISO/TC 229 - Nanotechnologies*. Genf, 06/2008.
- [77] F. KLAESSIG, M. MARRAPESE und A. SHUJI. „Current Perspectives in Nanotechnology Terminology and Nomenclature“. en. In: *Nanotechnology Standards*. Springer, 01/2011, S. 21–52. ISBN: 9781441978523.
- [78] S. C. ON EMERGING und N. I. H. R. (SCENIHR), Hrsg. *Scientific Basis for the Definition of the Term nanomaterial*. 12/2010. URL: ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_032.pdf (besucht am 02. 02. 2012).
- [79] M. P. BLENCOWE. „Nanoelectromechanical systems“. In: *Contemporary Physics* 46.4 (2005), 249–264.
- [80] K. L. EKINCI und M. L. ROUKES. „Nanoelectromechanical systems“. In: *Review of Scientific Instruments* 76.6 (2005), S. 061101. ISSN: 00346748. DOI: 10.1063/1.1927327.
- [81] L. LANG, M. HEGNER, C. GERBER und B. BHUSHAN. „Nanomechanical Cantilever Array Sensors“. In: *Springer Handbook of Nanotechnology*. Bd. 1. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007, S. 443–459.
- [82] H. MAYER. *Physik dünner Schichten: Herstellung, Dickemessung, optische Eigenschaften*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1950.
- [83] E. KOMMISSION. *High-Level Expert Group on Key Enabling Technologies - Enterprise and Industry*. Techn. Ber. 06/2011. URL: http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/ict/key_technologies/kets_high_level_group_en.htm (besucht am 19. 01. 2012).

-
- [84] B. FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG (BMBF). *Hightech-Strategie 2020 für Deutschland*. 2010. URL: <http://www.bmbf.de/de/6618.php> (besucht am 30. 07. 2012).
- [85] M. RAUBER. „Controlled Synthesis of Nanowire Assemblies by Ion-Track Template Electrodeposition“. Diss. Darmstadt, Deutschland: TU Darmstadt, Fachbereich Material- und Geowissenschaften, 2012.
- [86] A. POPP. „Untersuchungen zur templatgestützten Herstellung und zum Anwendungspotential hochgeordneter Kohlenstoffnanoröhren“. Dissertation. Eduard-Zintl-Institut, Anorganische und Physikalische Chemie, TUD, 2009.
- [87] R. JOSHI. „Synthesis, alignment, growth mechanism and functional properties of carbon nanotubes and their hybrid materials with inorganic and biomaterials“. Dissertation. TU Darmstadt, 2010.
- [88] B. ZIAIE, A. BALDI, A. M. und B. BHUSHAN. „Introduction to Micro/Nanofabrication“. In: *Springer Handbook of Nanotechnology*. Bd. 1. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007, S. 197–236.
- [89] C. N. R. RAO, F. L. DEEPAK, G. GUNDIAH und A. GOVINDARAJ. „Inorganic nanowires“. In: *Progress in Solid State Chemistry* 31.1-2 (2003), 5–147.
- [90] M. MEYYAPPAN. *Inorganic nanowires*. Boca Raton, Fla. [u.a.]: CRC Press, 2010. ISBN: 1-4200-6782-6.
- [91] M. MEYYAPPAN und J.-S. LEE. „The Quiet Revolution of Inorganic Nanowires“. In: *Nanotechnology Magazine, IEEE* 4.2 (2010), S. 4–9. ISSN: 1932-4510.
- [92] E. BROUSSEAU, S. DIMOV und D. PHAM. „Micro and Nano Manufacturing Technologies“. Deutsch. In: 3.7 (11/2010), S. 23–31.
- [93] M. ENDO. „Carbon Nanotube Research: Past and Future“. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 51 (2012), S. 040001. DOI: 10.1143/JJAP.51.040001.
- [94] B. KARN und H. MATTHEWS. „Nano Particles Without Macroproblems“. In: *IEEE Spectrum* 44.9 (09/2007), S. 55–58. ISSN: 0018-9235. DOI: 10.1109/MSPEC.2007.4296459.
- [95] DECHEMA, EMPA, F. IKTS, KIT, H. UFZ und UfU. *DaNa - Wissensplattform Nanomaterialien*. 10/2009. URL: <http://nanopartikel.info/cms> (besucht am 09. 06. 2012).
- [96] DaNa. *Laufende und abgeschlossene BMBF-Projekte zum Thema Auswirkungen von Nanomaterialien auf Mensch und Umwelt: DaNa FKZ 03X0075, CarbonBlack FKZ 03X0093, CarboTox FKZ 03X0109, Fe-NANOSIT FKZ 03X0082, NADINE FKZ 03X0087, NanoExpo FKZ 03X0098, NanoFlow FKZ 03X0077, NanoGEM FKZ 03X0105, NanoKon FKZ 03X0100, NanoMed FKZ 03X0104, NanoMembrane FKZ 03X0080, NanoPharm FKZ 03X0094, NanoPurification FKZ 03X0083, NanoSan FKZ 03X0085, Nano-SCR FKZ 03X0079, Nanosilberpartikel FKZ 03X0103, NanoTrack FKZ 03X0078, NAPASAN FKZ 03X0097, UMSICHT FKZ 03X0091, Inno.CNT, NanoKiesel FKZ 03X0081, InnoCNT-CarboSafe FKZ 03X0043, InnoCNT-CarboAir FKZ 03X0047, NanoCare FKZ 03X0021, INOS FKZ 03X0013, TRACER FKZ 03X0020*. 08/2012. URL: <http://nanopartikel.info/cms/Projekte> (besucht am 07. 08. 2012).

-
- [97] H. BECKER, W. DUBBERT, K. SCHWIRN und D. VÖLKER. „Nanotechnik für Mensch und Umwelt - Chancen fördern und Risiken mindern“. In: *Umweltbundesamt, Presse-Information* 75.2010 (2010), S. 28.
- [98] *Nanotechnologien - Erzeugung von Metall-Nanopartikeln zur Prüfung auf Toxizität nach Inhalation unter Verwendung des Verdampfungs-/Kondensationsverfahrens (ISO 10801:2010); Deutsche Fassung EN ISO 10801:2010*. ST, N. 04/2011.
- [99] DIN. *Nanotechnologien - Charakterisierung von Nanopartikeln in Inhalationskammern zur Prüfung auf Toxizität nach Inhalation (ISO 10808:2010); Deutsche Fassung EN ISO 10808:2010*. ST, N. 04/2011.
- [100] *Leitfaden zur sicheren Herstellung und bei Tätigkeiten mit Nanopartikeln an Arbeitsplätzen in der BASF SE*. Techn. Ber. 08/2008. URL: <http://www.basf.com/group/corporate/de/sustainability/dialogue/in-dialogue-with-politics/nanotechnology/employees> (besucht am 19.01.2012).
- [101] T. KUHNBUSCH, C. ASBACH, H. FISSAN, D. GÖHLER und M. STINTZ. „Nanoparticle exposure at nanotechnology workplaces: A review“. In: *Particle and Fibre Toxicology* 8.1 (2011), S. 22.
- [102] G. KORDECKI, R. KNÜPPEL und H. MEISINGER. *Ethische Aspekte der Nanotechnologie*. Eine Stellungnahme der Arbeitsgemeinschaft der Umweltbeauftragten in der EKD (AGU), Akzente. Texte-Materialien-Impulse, Iserlohn: Institut für Kirche und Gesellschaft. 2007. ISBN: 978-3-939115-06-9.
- [103] J. BAGDAHN. „Nutzung von reaktiven Nanoschichten zur Erzeugung dreidimensionaler Komponenten der Mikrosystemtechnik - FKZ 16SV3546“. In: *BMBF Schlussberichte* (2009).
- [104] J. BESSER, J. BRAEUER, M. WIEMER und T. GESSNER. „Elektrochemische Abscheidung von Pd/Zn-Multilagen für das Fügen mit reaktiven Materialsystemen“. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2011*. Berlin-Offenbach: VDE, 2011.
- [105] J. BRAEUER, J. BESSER, M. WIEMER und T. GESSNER. „A novel technique for MEMS packaging: Reactive bonding with integrated material systems“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 188 (12/2012), S. 212–219. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/j.sna.2012.01.015.
- [106] J. BRÄUER, J. BESSER, M. WIEMER und T. GESSNER. „Reaktive nanoskalige Mehrschichtsysteme lösen Temperaturprobleme bei Mikrosystemen - GMM-Preis 2012“. D. In: *Mechatronik* 120.12 (2012), S. 14–15.
- [107] D. S. U. A. AHARONY. *Perkolationstheorie*. Weinheim [u.a.]: VCH, 1995. ISBN: 3-527-29334-5.
- [108] T. HANEMANN. „Polymerbasierte Mikro- und Nanokomposite für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik“. ger. In: *Wissenschaftliche Berichte FZKA* 7184 (11/2005), S. 1–177. ISSN: 0947-8620.
- [109] E. RITZHAUPT-KLEISSL. „Transparente Polymer-Nanokomposite für Anwendungen in der Mikrooptik / Eberhard Ritzhaupt-Kleissl“. ger. Dissertation, Univ. Freiburg. 2007.

-
-
- [110] T. WICH, C. EDELER, C. STOLLE und S. FATIKOW. „Micro-nano-integration based on automated serial assembly“. In: *Automation Science and Engineering, 2009. CASE 2009. IEEE International Conference on*. 2009, S. 573–578.
- [111] V. CIMALLA, C.-C. RÖHLING, J. PEZOLD, M. NIEBELSCHÜTZ, O. AMBACHER, K. BRÜCKNER, M. HEIN, J. WEBER, S. MILENKOVIC, J. A. SMITH und A. W. HASSEL. „Nanomechanics of Single Crystalline Tungsten Nanowires“. In: *Journal of Nanomaterials* 2008 (2008).
- [112] F. VÖLKLEIN, M. SCHMITT, T. CORNELIUS, O. PICT, S. MÜLLER und R. NEUMANN. „Microchip for the Measurement of Seebeck Coefficients of Single Nanowires“. In: *Journal of Electronic Materials* 38.7 (07/2009), S. 1109–1115. DOI: 10.1007/s11664-009-0714-6.
- [113] C. G. KANG, J. W. KANG, S. K. LEE, S. Y. LEE, C. H. CHO, H. J. HWANG, Y. G. LEE, J. HEO, H.-J. CHUNG, H. YANG, S. SEO, S.-J. PARK, K. Y. KO, J. AHN und B. H. LEE. „Characteristics of CVD graphene nanoribbon formed by a ZnO nanowire hardmask“. In: *Nanotechnology* 22.29 (07/2011), S. 295201. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/29/295201.
- [114] S. FIEDLER, T. MÜLLER, M. ZWANZIG, M. JÄGER, M. BÖTTCHER, A. CSAKI, W. FRITZSCHE, S. HOWITZ, D. SCHMITT, N. HAMPP, W. SCHEEL, G. FUHR und H. REICHL. „Touch Less Component Handling - Towards Converging Assembly Strategies“. In: *mst|news* 3 (2008), S. 25–28.
- [115] M. LI und W. LI. „Exploring the Limits of Dielectrophoretic Nanoassembly“. In: *Nanotechnology Magazine, IEEE* 4.2 (2010), S. 14–18. ISSN: 1932-4510.
- [116] T. KOKER, U. GENGEBACH, K. BADE, K. SEEMANN, Z. PEÑA, A. KOLEW und VDE. „Mikro-Nano-Integration am Beispiel eines neuartigen Kohlenstoff-Nanoröhren-Aktors“. In: *MikroSystemTechnik Kongress 2007*. Berlin-Offenbach: VDE Verlag, 2007.
- [117] M. MUOTH und C. HIEROLD. „TRANSFER OF CARBON NANOTUBES ONTO MICROACTUATORS FOR HYSTERESIS-FREE TRANSISTORS AT LOW THERMAL BUDGET“. In: *MEMS 2012 Paris*. IEEE, 01/2012. ISBN: 978-978-1-4673-0325-5.
- [118] T. CORNELIUS, W. ENSINGER, R. NEUMANN und M. RAUBER. „Nanowires and Method for the Production thereof“. WO/2009/115230. 09/2009. (Besucht am 06.05.2012).
- [119] A. CAO, V. P. VEEDU, X. LI, Z. YAO, M. N. GHASEMI-NEJHAD und P. M. AJAYAN. „Multi-functional brushes made from carbon nanotubes“. In: *Nat Mater* 4.7 (07/2005), S. 540–545. ISSN: 1476-1122. DOI: 10.1038/nmat1415.
- [120] M. LINDEBERG. „High aspect ratio microsystem fabrication by ion track lithography“. Diss. Acta Universitatis Upsaliensis, 2003.
- [121] S. QUEDNAU und H. F. SCHLAAK. „Strukturierte Herstellung und In-Situ Erzeugung von metallischen Mikro- und Nanodrahtarrays in Mikrosystemen In-Situ Generation of structured metallic Micro- and Nanowire Ar-rays in Microsystems“. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2011*. Berlin-Offenbach: VDE, 2011.

-
- [122] H. GRUBER. *Nanotechnology - Small Scale High Potential Industrial Tool Box*. Techn. Ber. Silvia Quandt Research GmbH, 08/2008. URL: http://www.moreir.de/download/companies/nanostart/Other%20Information/nanotech_Report_210808.pdf (besucht am 19.01.2012).
- [123] C. BATTAGLIA, H. CERCELLIER, C. MONNEY, M. G. GARNIER und P. AEBI. „Stabilization of silicon honeycomb chains by trivalent adsorbates“. In: *Europhysics Letters (EPL)* 77.3 (02/2007), S. 36003. ISSN: 0295-5075, 1286-4854. DOI: 10.1209/0295-5075/77/36003.
- [124] T. CORNELIUS, W. ENSINGER, R. NEUMANN und M. RAUBER. „Nanowire Structural Element“. Publication number: US 2011/0211994 A1 U.S. Classification: 422/82.12. 09/2009. (Besucht am 06.05.2012).
- [125] M. RAUBER. *Herstellung und Charakterisierung von Edelmetall-Nanodraht-Arrays*. Techn. Ber. Phillips Universität Marburg, 2007.
- [126] C. KREMIN. „Fabrication and application of self-masked silicon nanostructures in deep reactive ion etching processes“. Diss. Ilmenau: TU Ilmenau, 2010.
- [127] O. JESSENSKY, F. MULLER und U. GOSELE. „Self-organized formation of hexagonal pore arrays in anodic alumina“. In: *Applied Physics Letters* 72.10 (1998), 1173–1175.
- [128] K. HATA, D. N. FUTABA, K. MIZUNO, T. NAMAI, M. YUMURA und S. IJIMA. „Water-Assisted Highly Efficient Synthesis of Impurity-Free Single-Walled Carbon Nanotubes“. en. In: *Science* 306.5700 (11/2004), S. 1362–1364. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1104962.
- [129] R. JOSHI, J. J. SCHNEIDER, O. YILMAZOGLU und D. PAVLIDIS. „Patterned growth of ultra long carbon nanotubes. Properties and systematic investigation into their growth process“. en. In: *J. Mater. Chem.* 20.9 (01/2010), S. 1717–1721. DOI: 10.1039/B919579C.
- [130] C. NICK, R. JOSHI, H. F. SCHLAACK, J. J. SCHNEIDER und C. THIELEMANN. „Multielektroden Array mit Elektroden aus Kohlenstoff Nanoröhren für die extrazelluläre Ableitung von Aktionspotentialen“. In: *Proceedings of the Mikrosystemtechnik Kongress 2011*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2011, S. 720–723. ISBN: 978-3-8007-3367-5.
- [131] C.-M. LIN, L.-Y. LIN und W. FANG. „Monolithic integration of carbon nanotubes based physical sensors“. In: *2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. 01/2010, S. 55–58. DOI: 10.1109/MEMSYS.2010.5442566.
- [132] W. FANG, H.-Y. CHU, W.-K. HSU, T.-W. CHENG und N.-H. TAI. „Polymer-Reinforced, Aligned Multiwalled Carbon Nanotube Composites for Microelectromechanical Systems Applications“. en. In: *Advanced Materials* 17.24 (2005), 2987–2992. ISSN: 1521-4095. DOI: 10.1002/adma.200501305.
- [133] A. KEIGLER, Z. LIU, J. CHIU und J. DREXLER. „300mm Wafer Copper Plating Challenges“. In: *Equipment Challenges for 3D Interconnect*. San Francisco, CA, USA, 07/2008.

-
-
- [134] D. G. KAM und J. KIM. „Foreword Special Section on Through Silicon Vias“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 152–153. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2011.2116970.
- [135] G. E. POSSIN. „A Method for Forming Very Small Diameter Wires“. In: *Review of Scientific Instruments* 41.5 (1970), S. 772. ISSN: 00346748. DOI: 10.1063/1.1684640.
- [136] C. RIEDEL und R. SPOHR. „Statistical properties of etched nuclear tracks“. In: *Radiation Effects* 42.1-2 (1979), S. 69–75. ISSN: 0033-7579. DOI: 10.1080/10420157908201738.
- [137] M. E. TOIMIL-MOLARES. „Characterization and properties of micro-and nanowires of controlled size, composition, and geometry fabricated by electrodeposition and ion-track technology“. In: *Beilstein journal of nanotechnology* 3.1 (2012), 860–883. DOI: 10.3762/bjnano.3.97.
- [138] C. TRAUTMANN. „Spuren energiereicher Ionen in Polymeren und metallischen Gläsern“. D. Dissertation, Univ. Frankfurt. Frankfurt: Johann Wolfgang Goethe Universität, 1994.
- [139] C. SCHÖNENBERGER, B. M. I. VAN DER ZANDE, L. G. J. FOKKINK, M. HENNY, C. SCHMID, M. KRÜGER, A. BACHTOLD, R. HUBER, H. BIRK und U. STAUFER. „Template Synthesis of Nanowires in Porous Polycarbonate Membranes: Electrochemistry and Morphology“. In: *The Journal of Physical Chemistry B* 101.28 (07/1997), S. 5497–5505. ISSN: 1520-6106. DOI: 10.1021/jp963938g.
- [140] C. G. ZOSKI, N. YANG, P. HE, L. BERDONDINI und M. KOUELKA-HEP. „Addressable Nanoelectrode Membrane Arrays: Fabrication and Steady-State Behavior“. In: *Analytical Chemistry* 79.4 (02/2007), S. 1474–1484. ISSN: 0003-2700. DOI: 10.1021/ac0619534.
- [141] M. SKUPINSKI, M. TOULEMONDE, M. LINDBERG und K. HJORT. „Ion tracks developed in polyimide resist on Si wafers as template for nanowires“. In: *NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM* 240.3 (11/2005), S. 681–689. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2005.04.128.
- [142] H. HANOT und E. FERAIN. „Industrial applications of ion track technology“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 267.6 (03/2009), S. 1019–1022. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2009.02.011.
- [143] G. SHARMA, C. S. CHONG, L. EBIN, V. KRIPESH, C. L. GAN und C. H. SOW. „Patterned micropads made of copper nanowires on silicon substrate for application as chip to substrate interconnects“. In: *Nanotechnology* 18.30 (08/2007), S. 305306. ISSN: 0957-4484. DOI: 10.1088/0957-4484/18/30/305306.
- [144] H. YOON, D. C. DESHPANDE, V. RAMACHANDRAN und V. K. VARADAN. „Aligned nanowire growth using lithography-assisted bonding of a polycarbonate template for neural probe electrodes“. In: *Nanotechnology* 19.2 (01/2008), S. 025304. ISSN: 0957-4484. DOI: 10.1088/0957-4484/19/02/025304.

-
- [145] B. FISCHER. „Single-particle techniques“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 54.1–3 (03/1991), S. 401–406. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/0168-583X(91)95544-N.
- [146] D. BRÜGGEMANN. „Nanostrukturierte Metallelektroden zur funktionalen Kopplung an neuronale Zellen“. de. Diss. Forschungszentrum Jülich, 2010.
- [147] D. WEBER, Y. MOURZINA, D. BRÜGGEMANN und A. OFFENHÄUSSER. „Large-Scale Patterning of Gold Nanopillars in a Porous Anodic Alumina Template by Replicating Gold Structures on a Titanium Barrier“. In: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 11.2 (2011), S. 1293–1296. DOI: 10.1166/jnn.2011.3110.
- [148] D. BRÜGGEMANN, B. WOLFRUM, V. MAYBECK, Y. MOURZINA, M. JANSEN und A. OFFENHÄUSSER. „Nanostructured gold microelectrodes for extracellular recording from electrogenic cells“. In: *Nanotechnology* 22.26 (07/2011), S. 265104. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/26/265104.
- [149] S. KARIM, W. ENSINGER, T. W. CORNELIUS, E. U. KHAN und R. NEUMANN. „Tuning the Characteristics of Electrochemically Fabricated Gold Nanowires“. In: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 8.11 (2008), 5659–5666. ISSN: 1533-4880.
- [150] N. KANANI. *Galvanotechnik: Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie*. Hanser Verlag, 06/2009. ISBN: 9783446417380.
- [151] J. C. PUIPPE, F. LEAMAN und A. KNÖDLER. *Pulse-Plating - Elektrolytische Metallabscheidung mit Pulsstrom - Theorie und Praxis* -. Eugen Leuze Verlag, 1986. ISBN: 0-936569-02-6.
- [152] S. KARIM, M. TOIMIL-MOLARES, F. MAURER, G. MIEHE, W. ENSINGER, J. LIU, T. CORNELIUS und R. NEUMANN. „Synthesis of gold nanowires with controlled crystallographic characteristics“. In: *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 84.4 (2006), S. 403–407. DOI: 10.1007/s00339-006-3645-6.
- [153] C.-C. YANG und H. Y. CHEH. „Pulsed Electrodeposition of Copper/Nickel Multilayers on a Rotating Disk Electrode - Galvanostatic and Potentiostatic Deposition“. In: *Journal of The Electrochemical Society* 142.9 (1995), S. 3034–3040. DOI: 10.1149/1.2048681.
- [154] J. NEWMAN und K. THOMAS-ALYEA. *Electrochemical systems*. Wiley-Interscience, 2004.
- [155] M. LISINENKOVA, L. HAHN, B. SCHULZ und K. BADE. *Megasonic Supported Mass Transport in LIGA-Microstructures - Megaschallunterstützter Stofftransport in LIGA-Mikrostrukturen*. Wissenschaftliche Berichte FZKA 7378. Karlsruhe: FZKA, 2007.
- [156] R. H. NILSON und S. K. GRIFFITHS. „Enhanced transport by acoustic streaming in deep trench-like cavities“. In: *Journal of the Electrochemical Society* 149 (2002), G286.
- [157] A. M. BOND, K. B. OLDHAM und C. G. ZOSKI. „Theory of electrochemical processes at an inlaid disc microelectrode under steady-state conditions“. In: *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 245.1–2 (04/1988), S. 71–104. ISSN: 0022-0728. DOI: 10.1016/0022-0728(88)80060-3.

-
- [158] K. B. OLDDHAM und C. G. ZOSKI. „Comparison of voltammetric steady states at hemispherical and disc microelectrodes“. In: *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 256.1 (11/1988), S. 11–19. ISSN: 0022-0728. DOI: 10.1016/0022-0728(88)85002-2.
- [159] R. H. BAUGHMAN, A. A. ZAKHIDOV und W. A. DE HEER. „Carbon nanotubes - the route toward applications“. In: *Science* 297.5582 (2002), 787–792.
- [160] C. HIEROLD. „From micro- to nanosystems: mechanical sensors go nano“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14.9 (2004), S1–S11. ISSN: 0960-1317.
- [161] A. V. MELECHKO, V. I. MERKULOV, T. E. MCKNIGHT, M. A. GUILLORN, K. L. KLEIN, D. H. LOWNDES und M. L. SIMPSON. „Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly“. In: *Journal of Applied Physics* 97.4 (2005), S. 041301. ISSN: 00218979. DOI: 10.1063/1.1857591.
- [162] A. ALLEN, A. CANNON, J. LEE, W. P. KING und S. GRAHAM. „Flexible microdevices based on carbon nanotubes“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.12 (12/2006), S. 2722–2729. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/16/12/027.
- [163] C. HIEROLD, A. JUNGEN, C. STAMPFER und T. HELBLING. „Nano electromechanical sensors based on carbon nanotubes“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 136.1 (05/2007), S. 51–61. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/j.sna.2007.02.007.
- [164] C. HIEROLD, O. BRAND, G. K. FEDDER, J. G. KORVINK und O. TABATA. *Carbon Nanotube Devices: Properties, Modeling, Integration and Applications*. en. Hrsg. von C. HIEROLD. John Wiley & Sons, 05/2008. ISBN: 9783527317202.
- [165] C. LI, E. T. THOSTENSON und T.-W. CHOU. „Sensors and actuators based on carbon nanotubes and their composites: A review“. In: *Composites Science and Technology* 68.6 (2008), S. 1227–1249. ISSN: 0266-3538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.01.006.
- [166] M. F. L. D. VOLDER, S. H. TAWFICK, R. H. BAUGHMAN und A. J. HART. „Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications“. en. In: *Science* 339.6119 (02/2013), S. 535–539. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1222453.
- [167] H. KNOBLOCH und Y. KAMINORZ. *MicroNano integration*. English. Berlin; New York: Springer, 2004. ISBN: 3540202528 9783540202523.
- [168] C. M. LIEBER und Z. L. WANG. „Functional Nanowires“. In: *MRS Bulletin* 32.02 (2007), S. 99–108. DOI: 10.1557/mrs2007.41.
- [169] M. WERNER und L.-G. JOHN. „Nanomaterials and Micro-Nano Integration: The Future of Micro Systems Technologies?“ In: 3 (2008), S. 4–6.
- [170] K. KALANTAR-ZADEH und B. FRY. *Nanotechnology-Enabled Sensors*. Boston, MA: Springer US, 2008. ISBN: 978-0-387-32473-9.
- [171] M. ESASHI. „Micro/nano electro mechanical systems for practical applications“. In: *Journal of Physics: Conference Series*. Bd. 187. 2009, S. 012001.

-
- [172] A. I. HOCHBAUM und P. YANG. „Semiconductor Nanowires for Energy Conversion“. In: *Chemical Reviews* 110.1 (01/2010), S. 527–546. ISSN: 0009-2665. DOI: 10.1021/cr900075v.
- [173] E. FERAIN und R. LEGRAS. „Templates for engineered nano-objects for use in microwave, electronic devices and biomedical sensing application“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 267.6 (03/2009), S. 1028–1031. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2009.02.013.
- [174] M. LINDBERG und K. HJORT. „A comprehensive study of ion track enabled high aspect ratio microstructures in flexible circuit boards“. In: *Microsystem Technologies* 10.8 (11/2004), S. 608–621. DOI: 10.1007/s00542-003-0339-2.
- [175] G. TSCHULENA und J. BOUCHAUD. „Sensoren übernehmen das Wachstum im weltweiten MEMS-Markt“. In: *SENSOR MAGAZIN* 25.3 (2008), S. 24.
- [176] P. SALOMON. „Microsystems - Worldwide Markets and the Changing Business Environment“. In: *Innovations in Microsystems 2010*. München, 03/2010.
- [177] G. TSCHULENA und N. SCHRÖDER. „Sensor Märkte bis 2016 - Dynamisches Wachstum des Weltmarktes für Sensorik“. In: *SENSOR MAGAZIN* 27.1 (2012), S. 6–8.
- [178] U. KLEINKES und I. LEHMANN. *Micro/Nano Atlas of Germany - A Survey of Micro- and Nanotechnology in Germany*. Eng. IVAM Research. Dortmund: IVAM, 05/2010.
- [179] J. LU, Z. CAO, D. ASLAM, N. SEPULVEDA und J. SULLIVAN. „Diamond micro and nano resonators using laser, capacitive or piezoresistive detection“. In: *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2008. NEMS 2008. 3rd IEEE International Conference on*. 01/2008, S. 873–876. DOI: 10.1109/NEMS.2008.4484462.
- [180] S. TAY, A. KROPACHEV, I. E. ARACI, T. SKOTHEIM, R. A. NORWOOD und N. PEYGHAMBARIAN. „Plasmonic thermal IR emitters based on nanoamorphous carbon“. In: *Applied Physics Letters* 94.7 (02/2009), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.3089225.
- [181] P. OHLCKERS, A. KROPACHEV und J. KUNSCH. „New Microsystems-Based IR Gas Sensing Technology“. In: *Proceedings on the 12th International Conference on Infrared Sensors and Systems IRS2 2011*. Nürnberg, 2011, 65–70.
- [182] J. F. K. RAUSCH. „Entwicklung und Anwendung miniaturisierter piezoresistiver Dehnungsmesselemente“. Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 07/2012.
- [183] H. BRUECKL und M. KAST. „Miniature Acceleration Sensor“. US8104345 (B2), CN101501504 (B), AT503995 (B1). CIB: G01P15/105; G01P15/08 ECLA: 01N8/00; 03/2009. URL: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20100603&CC=US&NR=2010132465A1&KC=A1 (besucht am 30. 11. 2010).

- [184] B. LEBENTAL, P. CHAINAIS, P. CHENEVIER, N. CHEVALIER, E. DELEVOYE, J.-M. FABBRI, S. NICOLETTI, P. RENAUX und A. GHIS. „Aligned carbon nanotube based ultrasonic microtransducers for durability monitoring in civil engineering“. In: *Nanotechnology* 22.39 (09/2011), S. 395501. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/39/395501.
- [185] A. HUSAIN, J. HONE, H. W. POSTMA, X. M. H. HUANG, T. DRAKE, M. BARBIC, A. SCHERER und M. L. ROUKES. „Nanowire-based very-high-frequency electromechanical resonator“. In: *Applied Physics Letters* 83 (2003), S. 1240.
- [186] V. CIMALLA, C. FOERSTER, F. WILL, K. TONISCH, K. BRUECKNER, R. STEPHAN, M. E. HEIN, O. AMBACHER und E. APERATHITIS. „Pulsed mode operation of strained micro-electromechanical resonators in air“. In: *Applied Physics Letters* 88.25 (06/2006), pages. ISSN: 0003-6951. DOI: 10.1063/1.2213950.
- [187] P. A. TRUITT, J. B. HERTZBERG, C. C. HUANG, K. L. EKINCI und K. C. SCHWAB. „Efficient and Sensitive Capacitive Readout of Nanomechanical Resonator Arrays“. In: *Nano Letters* 7.1 (01/2007), S. 120–126. DOI: 10.1021/nl062278g.
- [188] R. HE, X. L. FENG, M. L. ROUKES und P. YANG. „Self-Transducing Silicon Nanowire Electromechanical Systems at Room Temperature“. In: *Nano Letters* 8.6 (06/2008), S. 1756–1761. DOI: 10.1021/nl801071w.
- [189] A. KOUMELA, D. MERCIER, C. DUPRÉ, G. JOURDAN, C. MARCOUX, E. OLLIER, S. T. PURCELL und L. DURAFFOURG. „Piezoresistance of top-down suspended Si nanowires“. In: *Nanotechnology* 22.39 (09/2011), S. 395701. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/39/395701.
- [190] N. INSTRUMENTS. *AFM tips - High Resolution Solid Carbon Cone - 3 nm tip radius*. 08/2012. URL: <http://store.nanoscience.com/store/pc/viewCategories.asp?idCategory=160> (besucht am 07.08.2012).
- [191] MIKROMASCH. *SPM Probes - Conductive - CF*. 08/2012. URL: <http://www.spmtips.com/probes/cf> (besucht am 07.08.2012).
- [192] K. TONISCH, V. CIMALLA und F. WILL. „Nanowire-based electromechanical biomimetic sensor“. In: 37.1/2 (2007), S. 208–211.
- [193] G. J. M. KRIJNEN, M. DIJKSTRA, J. J. v. BAAR, S. S. SHANKAR, W. J. KUIPERS, R. J. H. D. BOER, D. ALTPETER, T. S. J. LAMMERINK und R. WIEGERINK. „MEMS based hair flow sensors as model systems for acoustic perception studies“. In: *Nanotechnology* 17.4 (02/2006), S84–S89. ISSN: 0957-4484. DOI: 10.1088/0957-4484/17/4/013.
- [194] M. N. MAT NAWI, A. A. MANAF, M. R. ARSHAD und O. SIDEK. „Review of MEMS flow sensors based on artificial hair cell sensor“. In: *Microsystem Technologies* 17.9 (08/2011), S. 1417–1426. ISSN: 0946-7076. DOI: 10.1007/s00542-011-1330-y.
- [195] H. DROOGENDIJK, C. M. BRUININK, R. G. P. SANDERS, A. M. K. DAGAMSEH, R. J. WIEGERINK und G. J. M. KRIJNEN. „Improving the performance of biomimetic hair-flow sensors by electrostatic spring softening“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 22.6 (06/2012), S. 065026. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/22/6/065026.

-
- [196] P. GIESCHKE, J. HELD, M. DOELLE, J. BARTHOLOMEYCZIK, P. RUTHER und O. PAUL. „CMOS Integrated Smart Cilia“. In: *MikroSystemTechnik* (2007).
- [197] S. LEOPOLD, C. KREMIN, A. ULBRICH, S. KRISCHOK und M. HOFFMANN. „Formation of silicon grass: Nanomasking by carbon clusters in cyclic deep reactive ion etching“. In: *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 29.1 (2011), S. 011002. DOI: 10.1116/1.3521490.
- [198] H. E. GMBH, S. T. T. GMBH, E. D. GMBH, M.-H. E. GMBH, F. E. S. GMBH, T. I. .-. I. FÜR MIKRO- UND NANOTECHNOLOGIEN und Z. FÜR MECHATRONIK UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (ZeMa) gGmbH. *Nanotechnologie basiertes Mikrosystem zum insitu-Fluidmonitoring - NaMiFlu, FKZ 16SV5355-16SV5361*. Berlin, 06/2012. URL: <http://www.vdivde-it.de/anmeldung/mni-mag-2012/vortraege/NaMiFlu.pdf>.
- [199] K. LILIENTHAL, M. STUBENRAUCH, M. FISCHER und A. SCHOBER. „Fused silica ‘glass grass’: fabrication and utilization“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 20.2 (02/2010), S. 025017. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/20/2/025017.
- [200] Y.-M. LIN, O. RABIN, S. B. CRONIN, J. Y. YING und M. S. DRESSELHAUS. „Semimetal-semiconductor transition in Bi1-xSbx alloy nanowires and their thermoelectric properties“. In: *Applied Physics Letters* 81.13 (09/2002), S. 2403-2405. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.1503873.
- [201] H. YOUSEF, K. HJORT und M. LINDBERG. „Vertical thermopiles embedded in a polyimide-based flexible printed circuit board“. In: *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS* 16.6 (12/2007), S. 1341-1348. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2007.907783.
- [202] F. VÖLKLEIN, H. REITH, T. CORNELIUS, M. RAUBER und R. NEUMANN. „The experimental investigation of thermal conductivity and the Wiedemann - Franz law for single metallic nanowires“. In: *Nanotechnology* 20 (2009), S. 325706.
- [203] B. FORG, F. HERRMANN, W. LENEKE, J. SCHIEFERDECKER, M. SIMON, K. STORCK und M. SCHULZE. „Thermopile infrared sensor in monolithic silicium microstructure“. EP2348294 (A1), US2011174978 (A1), KR20110084846 (A), JP2011145296 (A), DE102010042108 (A1). CIB: undefined ECLA: undefined. 07/2011.
- [204] M. A. AG, H. E. .-. I. FÜR MIKRO- UND INFORMATIONSTECHNIK, I. FÜR PHOTONISCHE TECHNOLOGIEN e.V. (IPHT), U. E. .-. I. FÜR MIKROSYSTEMTECHNIK, A. A. GMBH, H. I. GMBH, T. GMBH, M. E. GMBH, I. M. S. GMBH und M. C. G. GMBH. *Mikrotechnischer Taupunktsensor mit nanostrukturierten Kondensationskeimen zur schnellen Bestimmung minimalster Feuchteanteile in Gasen - NanoTau, FKZ 16SV5345-16SV5354*. Berlin, 06/2012. URL: <http://www.vdivde-it.de/anmeldung/mni-mag-2012/vortraege/NanoTau.pdf>.
- [205] T. DENG, K. K. VARANASI, M. HSU, N. BHATE, C. KEIMEL, J. STEIN und M. BLOHM. „Nonwetting of impinging droplets on textured surfaces“. In: *Applied Physics Letters* 94.13 (04/2009), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.3110054.
- [206] E. STRELCOV, Y. LILACH und A. KOLMAKOV. „Gas Sensor Based on Metal-Insulator Transition in VO2 Nanowire Thermistor“. In: *Nano Letters* 9.6 (06/2009), S. 2322-2326. DOI: 10.1021/nl900676n.

- [207] J. J. SCHNEIDER und D. PAVLIDIS. *Hochgeordnete mikro-nano-integrierte Kohlenstoff-nanoröhren (CNTs) als chemische Sensoren - MINI-CNTs, FKZ 16SV3554*. BMBF Schlussbericht. 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3554>.
- [208] A. POPP, O. YILMAZOGLU, O. KALDIRIM, J. J. SCHNEIDER und D. PAVLIDIS. „A self-supporting monolith of highly aligned carbon nanotubes as device structure for sensor applications“. en. In: *Chemical Communications* 22 (06/2009), S. 3205–3207. ISSN: 1364-548X. DOI: 10.1039/B900854C.
- [209] L. WU, F. SONG, X. FANG, Z.-X. GUO und S. LIANG. „A practical vacuum sensor based on a ZnO nanowire array“. In: *Nanotechnology* 21.47 (11/2010), S. 475502. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/21/47/475502.
- [210] L. PIRAUX, J. M. GEORGE, J. F. DESPRES, C. LEROY, E. FERAIN, R. LEGRAS, K. OUNADJELA und A. FERT. „Giant magnetoresistance in magnetic multilayered nanowires“. In: *Applied Physics Letters* 65.19 (11/1994), S. 2484–2486. ISSN: 00036951. DOI: doi: 10.1063/1.112672.
- [211] F. SAURENBACH, U. WALZ, L. HINCHEY, P. GRÜNBERG und W. ZINN. „Static and dynamic magnetic properties of Fe-Cr-layered structures with antiferromagnetic interlayer exchange“. In: *Journal of Applied Physics* 63.8 (04/1988), S. 3473–3475. ISSN: 00218979. DOI: doi:10.1063/1.340770.
- [212] M. N. BAIBICH, J. M. BROTO, A. FERT, F. NGUYEN VAN DAU, F. PETROFF, P. ETIENNE, G. CREUZET, A. FRIEDERICH und J. CHAZELAS. „Giant magnetoresistance of(001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices“. In: *Physical Review Letters* 61.21 (1988), 2472–2475.
- [213] S. GMBH. *Sensitec: Technologie: MR-Sensortechnologie*. de. URL: <http://www.sensitec.com/index.php?s=2,1,0> (besucht am 08.09.2012).
- [214] C. MUELLER, H. MARKOETTER, A. SCHLOESSER und S. ORLIC. „3D photonic gratings for optical sensing and image processing“. In: *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering*. 2008, 70530A–1.
- [215] C. S. AG, V. GMBH, MICRO RESIST TECHNOLOGY GMBH, F. IAP, I. FÜR DÜNNSSCHICHT-TECHNOLOGIE UND MIKROSENSORIK E.V., T. B. I. O. UND ATOM. PHYSIK und U. S. PHYSIK. *Nano- und Mikrostrukturierung von Photopolymeren und Nanokompositen als Raumgitter für die optische Sensorik - NAMIOS, FKZ 13N9040 - 13N9047*. BMBF Schlussbericht. 2010. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=namiros>.
- [216] K. KNESE, S. ARMBRUSTER, H. WEBER, M. FISCHER, H. BENZEL, M. METZ und H. SEIDEL. „Novel Technology for Capacitive Pressure Sensors with Monocrystalline Silicon Membranes“. In: *IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2009. MEMS 2009*. 01/2009, S. 697–700. DOI: 10.1109/ MEMSYS.2009.4805478.
- [217] T. WAITZ, M. TIEMANN, P. J. KLAR, J. SANN, J. STEHR und B. K. MEYER. „Crystalline ZnO with an enhanced surface area obtained by nanocasting“. In: *Applied Physics Letters* 90.12 (03/2007), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.2713872.

-
- [218] S. REICH, C. THOMSEN und J. MAULTZSCH. *Carbon nanotubes: basic concepts and physical properties*. Wiley-Vch, 2008.
- [219] S. J. TANS, A. R. M. VERSCHUEREN und C. DEKKER. „Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube“. en. In: *Nature* 393.6680 (05/1998), S. 49–52. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/29954.
- [220] R. MARTEL, T. SCHMIDT, H. R. SHEA, T. HERTEL und P. AVOURIS. „Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors“. In: *Applied Physics Letters* 73.17 (10/1998), S. 2447–2449. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.122477.
- [221] S. J. WIND, J. APPENZELLER, R. MARTEL, V. DERYCKE und P. AVOURIS. „Vertical scaling of carbon nanotube field-effect transistors using top gate electrodes“. In: *Applied Physics Letters* 80.20 (05/2002), S. 3817–3819. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.1480877.
- [222] M. VERISSIMO-ALVES, B. KOILLER, H. CHACHAM und R. B. CAPAZ. „Electromechanical effects in carbon nanotubes: Ab initio and analytical tight-binding calculations“. In: *Physical Review B* 67.16 (04/2003), S. 161401. DOI: 10.1103/PhysRevB.67.161401.
- [223] S. W. LEE, D. S. LEE, R. E. MORJAN, S. H. JHANG, M. SVENINGSSON, O. A. NERUSHEV, Y. W. PARK und E. E. B. CAMPBELL. „A Three-Terminal Carbon Nanorelay“. In: *Nano Letters* 4.10 (10/2004), S. 2027–2030. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl049053v.
- [224] A. B. KAUL, E. W. WONG, L. EPP und B. D. HUNT. „Electromechanical Carbon Nanotube Switches for High-Frequency Applications“. In: *Nano Letters* 6.5 (05/2006), S. 942–947. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl052552r.
- [225] P. KIM und C. M. LIEBER. „Nanotube Nanotweezers“. en. In: *Science* 286.5447 (12/1999), S. 2148–2150. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.286.5447.2148.
- [226] R. H. BAUGHMAN, C. CUI, A. A. ZAKHIDOV, Z. IQBAL, J. N. BARISCI, G. M. SPINKS, G. G. WALLACE, A. MAZZOLDI, D. D. ROSSI, A. G. RINZLER, O. JASCHINSKI, S. ROTH und M. KERTESZ. „Carbon Nanotube Actuators“. en. In: *Science* 284.5418 (05/1999), S. 1340–1344. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.284.5418.1340.
- [227] A. M. FENNIMORE, T. D. YUZVINSKY, W.-Q. HAN, M. S. FUHRER, J. CUMINGS und A. ZETTL. „Rotational actuators based on carbon nanotubes“. en. In: *Nature* 424.6947 (07/2003), S. 408–410. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/nature01823.
- [228] J. C. MEYER, M. PAILLET und S. ROTH. „Single-Molecule Torsional Pendulum“. en. In: *Science* 309.5740 (09/2005), S. 1539–1541. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1115067.
- [229] M. FREITAG, J. C. TSANG, J. KIRTLEY, A. CARLSEN, J. CHEN, A. TROEMAN, H. HILGENKAMP und P. AVOURIS. „Electrically Excited, Localized Infrared Emission from Single Carbon Nanotubes“. In: *Nano Letters* 6.7 (07/2006), S. 1425–1433. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl060462w.

- [230] J. CHEN, V. PEREBEINOS, M. FREITAG, J. TSANG, Q. FU, J. LIU und P. AVOURIS. „Bright Infrared Emission from Electrically Induced Excitons in Carbon Nanotubes“. en. In: *Science* 310.5751 (11/2005), S. 1171–1174. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1119177.
- [231] T. W. TOMBLER, C. ZHOU, L. ALEXSEYEV, J. KONG, H. DAI, L. LIU, C. S. JAYANTHI, M. TANG, S. Y. WU u. a. „Reversible electromechanical characteristics of carbon nanotubes under local-probe manipulation“. In: *Nature* 405.6788 (2000), 769–772.
- [232] E. D. MINOT, Y. YAISH, V. SAZONOVA, J.-Y. PARK, M. BRINK und P. L. MCEUEN. „Tuning carbon nanotube bandgaps with strain“. In: *arXiv:cond-mat/0211152* (11/2002). DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.156401.
- [233] J. CAO, Q. WANG und H. DAI. „Electromechanical Properties of Metallic, Quasi-metallic, and Semiconducting Carbon Nanotubes under Stretching“. In: *Physical Review Letters* 90.15 (04/2003), S. 157601. DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.157601.
- [234] W. A. D. HEER, A. CHÂTELAIN und D. UGARTE. „A Carbon Nanotube Field-Emission Electron Source“. en. In: *Science* 270.5239 (11/1995), S. 1179–1180. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.270.5239.1179.
- [235] C. STAMPFER, T. HELBLING, D. OBERGFELL, B. SCHÖBERLE, M. K. TRIPP, A. JUNGEN, S. ROTH, V. M. BRIGHT und C. HIEROLD. „Fabrication of Single-Walled Carbon-Nanotube-Based Pressure Sensors“. In: *Nano Letters* 6.2 (02/2006), S. 233–237. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl052171d.
- [236] R. J. GROW, Q. WANG, J. CAO, D. WANG und H. DAI. „Piezoresistance of carbon nanotubes on deformable thin-film membranes“. In: *Applied Physics Letters* 86.9 (02/2005), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.1872221.
- [237] C. STAMPFER, A. JUNGEN und C. HIEROLD. „Fabrication of discrete nanoscaled force sensors based on single-walled carbon nanotubes“. In: *IEEE Sensors Journal* 6.3 (06/2006), S. 613–617. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2006.874490.
- [238] C. STAMPFER, A. JUNGEN, R. LINDERMAN, D. OBERGFELL, S. ROTH und C. HIEROLD. „Nano-Electromechanical Displacement Sensing Based on Single-Walled Carbon Nanotubes“. In: *Nano Letters* 6.7 (07/2006), S. 1449–1453. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl0606527.
- [239] M. NISHIO, S. SAWAYA, S. AKITA und Y. NAKAYAMA. „Carbon nanotube oscillators toward zeptogram detection“. In: *Applied Physics Letters* 86.13 (03/2005), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.1896426.
- [240] L. M. JONSSON, L. Y. GORELIK, R. I. SHEKHTER und M. JONSON. „Electromechanical Instability in Suspended Carbon Nanotubes“. In: *Nano Letters* 5.6 (06/2005), S. 1165–1169. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl050531r.
- [241] D. A. STEWART und F. LÉONARD. „Energy Conversion Efficiency in Nanotube Optoelectronics“. In: *Nano Letters* 5.2 (02/2005), S. 219–222. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl048410z.
- [242] J. XU. „Highly ordered carbon nanotube arrays and IR detection“. In: *Infrared Physics & Technology* 42.3–5 (06/2001), S. 485–491. ISSN: 1350-4495. DOI: 10.1016/S1350-4495(01)00102-5.

-
- [243] I. ELISHAKOFF. *Carbon Nanotubes and Nanosensors: Vibration, Buckling and Ballistic Impact*. 1. Aufl. Wiley-ISTE, 03/2012. ISBN: 184821345X.
- [244] M. LINDEBERG, H. YOUSEF, H. RÖDJEGÅRD, H. MARTIN und K. HJORT. „A PCB-like process for vertically configured thermopiles“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18.6 (06/2008), S. 065021. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/18/6/065021.
- [245] M. LINDEBERG. *JonDeTech AB*. URL: <http://jondetech.com> (besucht am 16.02.2012).
- [246] H. YOUSEF, K. HJORT und M. LINDEBERG. „Vertical Thermopiles Embedded in a Polyimide-Based Flexible Printed Circuit Board“. English. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 16.6 (12/2007), S. 1341–1348. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2007.907783.
- [247] H. G. E. MARTIN, M. E. P. LINDEBERG, H. A. YOUSEF und K. A. HJORT. „A Method for Processing a Thin Film Substrate“. US7176578 (B2), EP1621054 (B1), AU2004234763 (B2). 05/2008. (Besucht am 01.06.2012).
- [248] X. LÜ. „Longitudinal thermal conductivity of radial nanowire heterostructures“. In: *Journal of Applied Physics* 106.6 (09/2009), pages. ISSN: 00218979. DOI: doi: 10.1063/1.3223329.
- [249] A. GRAF, M. ARNDT, M. SAUER und G. GERLACH. „Review of micromachined thermopiles for infrared detection“. In: *Measurement Science and Technology* 18.7 (07/2007), R59–R75. ISSN: 0957-0233, 1361-6501. DOI: 10.1088/0957-0233/18/7/R01.
- [250] M. LINDEBERG und K. HJORT. „High aspect ratio "multiple wire" microvias in flexible PCBs“. In: *CIRCUIT WORLD* 35.4 (2009), S. 18–21. ISSN: 0305-6120. DOI: 10.1108/03056120911002370.
- [251] M. LINDEBERG, J. BUCKLEY, G. POSSNERT und K. HJORT. „Deep ion projection lithography in PMMA: Substrate heating and ion energy concerns“. In: *MICROSYSTEM TECHNOLOGIES* 6.4 (04/2000), S. 135–140. ISSN: 0946-7076.
- [252] T. OHGAI, L. GRAVIER, X. HOFFER, M. LINDEBERG, K. HJORT, R. SPOHR und J. ANSERMET. „Template synthesis and magnetoresistance property of Ni and Co single nanowires electrodeposited into nanopores with a wide range of aspect ratios“. In: *JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS* 36.24 (12/2003), S. 3109–3114. ISSN: 0022-3727.
- [253] M. LINDEBERG und K. HJORT. „Interconnected nanowire clusters in polyimide for flexible circuits and magnetic sensing applications“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 105.2 (07/2003), S. 150–161. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00088-8.
- [254] H. YOUSEF, K. HJORT und M. LINDEBERG. „Reliable small via interconnects made of multiple sub-micron wires in flexible PCB“. In: *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING* 17.4 (04/2007), S. 700–708. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/17/4/005.

- [255] H. YOUSEF, M. LINDBERG und K. HJORT. „Ion track enabled multiple wire micro-via interconnects in printed circuit boards“. In: *NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION B-BEAM* 266.8 (04/2008), S. 1659–1665. ISSN: 0168-583X. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.11.014.
- [256] H. YOUSEF, K. HJORT und M. LINDBERG. „Plated through-hole vias in a porous polyimide foil for flexible printed circuit boards“. In: *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING* 18.1 (01/2008). ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/18/1/017001.
- [257] P. LOTZ, M. MATYSEK, P. LECHNER, M. HAMANN und H. F. SCHLAAK. „Dielectric elastomer actuators using improved thin film processing and nanosized particles“. In: *Smart Structures/NDE. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) X. Proceedings of SPIE*, Bd. Bd. 6927. 2008, S. 692723.
- [258] P. LOTZ. „Dielektrische Elastomerstapelaktoren für ein peristaltisches Fluidförder-system“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 12/2009.
- [259] M. MATYSEK, P. LOTZ, K. FLITTNER und H. F. SCHLAAK. „New Electrode Materials and Technologies for Enhanced Performance of Stacked Dielectric Elastomer Actuators“. In: *Conference proceedings: Actuator 2008, 11th International Conference on New Actuators and 5th International Exhibition on Smart Actuators and Drive Systems*. Bremen, 06/2008.
- [260] M. MATYSEK. „Dielektrische Elastomeraktoren in Multilayer-Technologie für taktile Displays“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 01/2010.
- [261] L. MÜLLER, C. KREMIN und M. HOFFMANN. „Mittels Nanostrukturierung optimierte Bimorph-Biegeaktoren großer Auslenkung - Thermal large deflection bimorph actuator enhanced by nanostructures“. In: Berlin-Offenbach: VDE, 2011.
- [262] M. TAHHAN, V.-T. TRUONG, G. M. SPINKS und G. G. WALLACE. „Carbon nanotube and polyaniline composite actuators“. In: *Smart Materials and Structures* 12.4 (08/2003), S. 626–632. ISSN: 0964-1726, 1361-665X. DOI: 10.1088/0964-1726/12/4/313.
- [263] T. KOKER. *Konzeption und Realisierung einer neuen Prozesskette zur Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren über Handhabung in technische Anwendungen*. 1. Aufl. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2007. ISBN: 9783866440562.
- [264] T. MIRFAKHRAI, J. Y. OH, M. KOZLOV, S. L. FANG, M. ZHANG, R. H. BAUGHMAN und J. D. MADDEN. „Carbon Nanotube Yarns as High Load Actuators and Sensors“. In: *Advances in Science and Technology* 61 (2008), S. 65–74. ISSN: 1662-0356. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.61.65.
- [265] T. KOKER, A. KOLEW, U. GENGENBACH und G. BRETTHAUER. *Integration von Kohlenstoff-Nanoröhren in Mikrostrukturen mit Potenzial für industrielle Anwendbarkeit - INNTEKA, FKZ 16SV3536*. Karlsruhe [u.a.], 07/2008.
- [266] T. KOKER und U. GENGENBACH. „Actuator on the basis of geometrically anisotropic nanoparticles“. US7829054 (B2). 09/2010.

-
- [267] J. W. KANG und H. J. HWANG. „Gigahertz actuator of multiwall carbon nanotube encapsulating metallic ions: molecular dynamics simulations“. In: *Journal of Applied Physics* 96.7 (10/2004), S. 3900–3905. ISSN: 00218979. DOI: doi:10.1063/1.1785837.
- [268] B. LANDI, R. RAFFAELLE, M. HEBEN, J. ALLEMAN, W. VANDERVEER und T. GENNETT. „Development and characterization of single wall carbon nanotube - Nafion composite actuators“. In: *Materials Science and Engineering: B* 116.3 (02/2005), S. 359–362. ISSN: 0921-5107. DOI: 10.1016/j.mseb.2004.05.047.
- [269] R. SHANKAR, T. K. GHOSH und R. J. SPONTAK. „Dielectric elastomers as next-generation polymeric actuators“. In: *Soft Matter* 3.9 (2007), S. 1116. ISSN: 1744-683X, 1744-6848. DOI: 10.1039/b705737g.
- [270] Y. EUN, J. CHOI, H. NA, D.-H. BAEK, M.-O. KIM, J.-I. LEE und J. KIM. „Continuously Latchable Shuttle using Carbon Nanotubes on Sidewall Surfaces“. In: *MEMS 2012 Paris*. IEEE, 01/2012. ISBN: 978-978-1-4673-0325-5.
- [271] J. CHOI, Y. EUN und J. KIM. „Integrated Carbon Nanotube Arrays for Reliable Contact in Electromechanical Memory Device“. In: *MEMS 2012 Paris*. IEEE, 01/2012. ISBN: 978-978-1-4673-0325-5.
- [272] L. DITTRICH, S. MORGENBRODT, C. ENDRÖDY und M. HOFFMANN. *Nanostrukturen als Aktoren in Mikropumpen - NanoMiPu, FKZ 16SV5368*. Berlin, 06/2012. URL: <http://www.vdivde-it.de/anmeldung/mni-mag-2012/vortraege/NanoMiPu.pdf>.
- [273] S. BAEK und R. FEARING. „Reducing Contact Resistance Using Compliant Nickel Nanowire Arrays“. In: *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 31.4 (2008), S. 859–868. ISSN: 1521-3331.
- [274] S. NOEL, D. ALAMARGUY, F. HOUZE, A. BENEDETTO, P. VIEL, S. PALACIN, N. IZARD und P. CHENEVIER. „Nanocomposite thin films for surface protection in electrical contact applications“. In: *Electrical contacts - 2007, the 53rd ieee holm conference on*. 2007, S. 160–166.
- [275] Z. BURTON und B. BHUSHAN. „Hydrophobicity, Adhesion, and Friction Properties of Nanopatterned Polymers and Scale Dependence for Micro- and Nanoelectromechanical Systems“. In: *Nano Letters* 5.8 (08/2005), S. 1607–1613. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl050861b.
- [276] J. LEE, C. MAJIDI, B. SCHUBERT und R. S. FEARING. „Sliding-induced adhesion of stiff polymer microfibre arrays. I. Macroscale behaviour“. en. In: *Journal of The Royal Society Interface* 5.25 (08/2008), S. 835–844. ISSN: 1742-5689, 1742-5662. DOI: 10.1098/rsif.2007.1308.
- [277] B. SCHUBERT, J. LEE, C. MAJIDI und R. S. FEARING. „Sliding-induced adhesion of stiff polymer microfibre arrays. II. Microscale behaviour“. en. In: *Journal of The Royal Society Interface* 5.25 (08/2008), S. 845–853. ISSN: 1742-5689, 1742-5662. DOI: 10.1098/rsif.2007.1309.
- [278] J. LEE, R. S. FEARING und K. KOMVOPOULOS. „Directional adhesion of gecko-inspired angled microfiber arrays“. In: *Applied Physics Letters* 93.19 (11/2008), S. 191910–3.

- [279] D. PARETKAR, A. S. SCHNEIDER, E. KRONER und E. ARZT. „In Situ Observation of Contact Mechanisms in Bioinspired Adhesives at High Magnification“. In: *MRS Communications* 1.01 (2011), S. 53–56. DOI: 10.1557/mrc.2011.16.
- [280] L. FORRO. „Beyond Gedanken Experiments“. en. In: *Science* 289.5479 (07/2000), S. 560–561. ISSN: 0036-8075, 1095-9203. DOI: 10.1126/science.289.5479.560.
- [281] V. V. DESHPANDE, H.-Y. CHIU, H. W. C. POSTMA, C. MIKO, L. FORRO und M. BOCKRATH. „Carbon Nanotube Linear Bearing Nanoswitches“. In: *Nano Letters* 6.6 (2006), S. 1092–1095. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl052513f.
- [282] S. X. PAN. „High contrast spatial light modulator and method“. U.S. Classification: 359/291 International Classification: G02B026/00. URL: <http://www.google.de/patents/US20050128564> (besucht am 18.03.2013).
- [283] J. KIM, H. LEE, B. KIM, J.-W. JEON, J.-B. YOON und E. YOON. „A high fill-factor micro-mirror stacked on a crossbar torsion spring for electrostatically-actuated two-axis operation in large-scale optical switch“. In: *IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto*, S. 259–262. DOI: 10.1109/MEMSYS.2003.1189735.
- [284] K. JIA, S. PAL und H. XIE. „High-fill-factor, tip-tilt-piston micromirror array with hidden bimorph actuators and surface mounting capability“. In: *2009 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics*. Clearwater, FL, USA, 2009, S. 67–68. DOI: 10.1109/OMEMS.2009.5338594.
- [285] K. JIA, S. R. SAMUELSON und H. XIE. „High-Fill-Factor Micromirror Array With Hidden Bimorph Actuators and Tip-Tilt-Piston Capability“. English. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 20.3 (06/2011), S. 573–582. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2011.2127449.
- [286] L. WU, S. R. SAMUELSON, J. SUN, W. LAU, S. CHOE, B. S. SORG, K. JIA und H. XIE. „A 2.8-mm Imaging Probe based on a High-Fill-Factor MEMS Mirror and Wire-Bonding-Free Packaging for Endoscopic Optical Coherence Tomography“. In: *24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. Cancun, Mexico: IEEE, 01/2011. ISBN: 978-1-4244-9633-4/11.
- [287] C. P. BROPHY, X. R. FU, D. W. LAMBERT und P. P. MERCHANT. „MEMS mirror and method of fabrication“. US20020075554A1. US Patent App. 09/919,325. 07/2001.
- [288] B. K. JULURI, A. S. KUMAR, Y. LIU, T. YE, Y.-W. YANG, A. H. FLOOD, L. FANG, J. F. STODDART, P. S. WEISS und T. J. HUANG. „A Mechanical Actuator Driven Electrochemically by Artificial Molecular Muscles“. In: *ACS Nano* 3.2 (02/2009), S. 291–300. ISSN: 1936-0851. DOI: 10.1021/nn8002373.
- [289] T. HATSUZAWA, M. HAYASE und T. OGUCHI. „A linear actuator based on cilia vibration“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 105.2 (07/2003), S. 183–189. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(03)00093-1.
- [290] A. BASCHIROTTO, F. BORGHETTI, E. DALLAGO, P. MALCOVATI, M. MARCHESI, E. MELISSANO, P. SICILIANO und G. VENCHI. „Fluxgate magnetic sensor and front-end circuitry in an integrated microsystem“. In: *The 19th European Conference on Solid-State Transducers* 132.1 (2006), S. 90–97.

-
- [291] P. P. POTT, A. CARRASCO und H. F. SCHLAAK. „Ciliae-based actuator with piezoelectric excitation“. In: *Smart Materials and Structures* 21.6 (06/2012), S. 064010. ISSN: 0964-1726, 1361-665X. DOI: 10.1088/0964-1726/21/6/064010.
- [292] D. EICHER und H. F. SCHLAAK. „Elektrothermische Aktoren aus SU-8 für den Einsatz in miniaturisierten Schrittantrieb“. In: *Proceedings of the MikroSystemTechnik-Kongress 2007*. Dresden, 2007.
- [293] D. EICHER. „Entwurf und tiefenlithographische Realisierung mikrostrukturierter Schrittantriebe“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt, 05/2011.
- [294] W. R. HANSEN und K. AUTUMN. „Evidence for self-cleaning in gecko setae“. en. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102.2 (01/2005), S. 385–389. ISSN: 0027-8424, 1091-6490. DOI: 10.1073/pnas.0408304102.
- [295] C. BELLMANN, R. SARWAR, A. STEINKE, T. FRANK, H. F. SCHLAAK und G. GERLACH. „Development of a humidity micro switch based on humidity sensitive polymers“. In: *Proceedings of the 23rd Micromechanics and Microsystems Europe Workshop 2012*. Ilmenau, 09/2012.
- [296] M. WIRTS-RÜTTERS. *Nanomaterialien für eine skalenübergreifende AVT - Nanoskala, FKZ 16SV3571*. BMBF Schlussbericht. Bremen, 2008. URL: opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=8/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3571.
- [297] M. ALLEN, K. JAAKKOLA, K. NUMMILA und H. SEPPÄ. „Applicability of Metallic Nanoparticle Inks in RFID Applications“. In: *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 32.2 (2009), S. 325–332. ISSN: 1521-3331.
- [298] S. PAYDAVOSI, F. M. YAUL, A. I. WANG, F. NIROUI, T. L. ANDREW, V. BULOVIĆ und J. H. LANG. „MEMS Switches employing Active Metal-Polymer Nanocomposites“. In: *MEMS 2012 Paris*. IEEE, 01/2012. ISBN: 978-978-1-4673-0325-5.
- [299] A. STRANZ, Ü. SÖKMEN, E. PEINER und A. WAAG. *Nanomaterialien für die Mikrosystem- und Halbleitertechnik (NAMIHA), TP B: Nanotechnologie-Verbindungstechnik (NTV) - FKZ 16SV3548*. BMBF Schlussbericht. Braunschweig, 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3548>.
- [300] R. KUISL und S. GUTTOWSKI. *Nanorasenverbindungen als Element der Mikro-Nano-Integration - Realisierung - mechanische Charakterisierung - elektrische Modellierung - NanoLawn, FKZ16SV3542*. BMBF Schlussbericht. Berlin, 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=1/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3542>.
- [301] R. SCHMIDT und M. ZWANZIG. „Gravitationsgestützte galvanische Abscheidung zur Erzeugung dreidimensional kristallin strukturierter Oberflächen“. In: *Galvanotechnik* 101.5 (2010), 1010–1015.
- [302] F. STAM, K. RAZEEB, S. SALWA und A. MATHEWSON. „Micro-nano interconnect between gold bond pads and copper nano-wires embedded in a polymer template“. In: *Electronic Components and Technology Conference, 2009. ECTC 2009. 59th*. 2009, S. 1470–1474. ISBN: 0569-5503. DOI: 10.1109/ECTC.2009.5074206.

- [303] B. PAWLOWSKI und B. VOIGTSBERGER. *Abschlussbericht zum Verbundprojekt: Realisierung neuartiger Verbindungsverfahren zwischen selbstorganisierten, nanostrukturierten Silicioberflächen und adaptierten LTCC-Folien - Nano-SILKE*, FKZ 16SV3549. BMBF Schlussbericht. Hermsdorf: HITK, 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3549>.
- [304] H. BARTSCH DE TORRES. *Schlussbericht zum Projekt: Realisierung neuartiger Verbindungsverfahren zwischen selbstorganisierten, nanostrukturierten Silicioberflächen und adaptierten LTCC-Folien - Nano-SILKE*, FKZ 16SV3566. BMBF Schlussbericht. Ilmenau, 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3566>.
- [305] U. MESCHEDER. *Forschungsprojekt Skalierbare Verbindungstechnik mittel anpassbarer nanoskaliger Verbindungsstrukturen - NanoBond*, FKZ 16SV3550. BMBF Schlussbericht. Furtwangen, 2009. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=2/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3550>.
- [306] U. MESCHEDER, A. KOVACS, P. JONNALAGADDA und A. NIMO. „Self-adjusting bonding method for positioning, fixing, contacting of chip on silicon surface, involves nano-structuring surface area of chip or chip carrier, where surface areas of needle are auxiliary nano-porous“. DE102009008772 (A1). CIB: B81B1/00; B81C3/00; B82B1/00; H01L21/58; H01L23/14. 01/2011.
- [307] H. KO, J. LEE, B. SCHUBERT, Y. CHUEH, P. LEU, R. FEARING und A. JAVEY. „Hybrid Core-Shell Nanowire Forests as Self-Selective Chemical Connectors“. In: *Nano Lett* 9.5 (2009), S. 2054–2058.
- [308] M. MOLARES, A. BALOGH, T. CORNELIUS, R. NEUMANN und C. TRAUTMANN. „Fragmentation of nanowires driven by Rayleigh instability“. In: *Applied physics letters* 85.22 (2004), S. 5337–5339. DOI: 10.1063/1.1826237.
- [309] S. KARIM, M. E. TOIMIL-MOLARES, A. G. BALOGH, W. ENSINGER, T. W. CORNELIUS, E. U. KHAN und R. NEUMANN. „Morphological evolution of Au nanowires controlled by Rayleigh instability“. In: *Nanotechnology* 17 (2006), 5954–5959. DOI: 10.1088/0957-4484/17/24/009.
- [310] S. KARIM, M. E. TOIMIL-MOLARES, W. ENSINGER, A. G. BALOGH, T. W. CORNELIUS, E. U. KHAN und R. NEUMANN. „Influence of crystallinity on the Rayleigh instability of gold nanowires“. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 40 (2007), S. 3767. DOI: 10.1088/0022-3727/40/12/031.
- [311] H. JIANG und C. WONG. „Low Processing Temperature of Lead-Free Solder Interconnects [Nanopackaging]“. In: *Nanotechnology Magazine, IEEE* 4.2 (2010), S. 20–23. ISSN: 1932-4510. DOI: 10.1109/MNANO.2010.936604.
- [312] W. HOENLEIN. „New prospects for microelectronics: carbon nanotubes“. In: *Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2001 International*. 2001, S. 76–77. DOI: 10.1109/IMNC.2001.984086.
- [313] A. P. GRAHAM, G. S. DUESBERG, R. V. SEIDEL, M. LIEBAU, E. UNGER, W. PAMLER, F. KREUPL und W. HOENLEIN. „Carbon nanotubes for microelectronics?“. In: *Small* 1.4 (2005), 382–390.

-
- [314] Y. ZHOU, S. SREEKALA, P. M. AJAYAN und S. K. NAYAK. „Resistance of copper nanowires and comparison with carbon nanotube bundles for interconnect applications using first principles calculations“. In: *Journal of Physics: Condensed Matter* 20.9 (03/2008), S. 095209. ISSN: 0953-8984, 1361-648X. DOI: 10.1088/0953-8984/20/9/095209.
- [315] T.-H. KIM, X.-G. ZHANG, D. M. NICHOLSON, B. M. EVANS, N. S. KULKARNI, B. RADHAKRISHNAN, E. A. KENIK und A.-P. LI. „Large Discrete Resistance Jump at Grain Boundary in Copper Nanowire“. In: *Nano Letters* 10.8 (08/2010), S. 3096–3100. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl101734h.
- [316] P. DIXIT und J. MIAO. „Fabrication of high aspect ratio 35 μm pitch interconnects for next generation 3-D wafer level packaging by through-wafer copper electroplating“. In: *Electronic Components and Technology Conference, 2006. Proceedings. 56th.* 2006, 6 pp. ISBN: 0569-5503.
- [317] P. DIXIT, C. W. TAN, L. XU, N. LIN, J. MIAO, J. H. PANG, P. BACKUS und R. PREISSER. „Fabrication and characterization of fine pitch on-chip copper interconnects for advanced wafer level packaging by a high aspect ratio through AZ9260 resist electroplating“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 17.5 (2007), 1078–1086.
- [318] W. AHMAD, L.-R. ZHENG, Q. CHEN und H. TENHUNEN. „Peak-to-Peak Ground Noise on a Power Distribution TSV Pair as a Function of Rise Time in 3-D Stack of Dies Interconnected Through TSVs“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 196–207. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2099732.
- [319] J. S. PAK, J. KIM, J. CHO, K. KIM, T. SONG, S. AHN, J. LEE, H. LEE, K. PARK und J. KIM. „PDN Impedance Modeling and Analysis of 3D TSV IC by Using Proposed P/G TSV Array Model Based on Separated P/G TSV and Chip-PDN Models“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 208–219. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2101771.
- [320] Z. XU und J.-Q. LU. „High-Speed Design and Broadband Modeling of Through-Strata-Vias (TSVs) in 3D Integration“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 154–162. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2101693.
- [321] S. HU, L. WANG, Y.-Z. XIONG, T.-G. LIM, B. ZHANG, J. SHI und X. YUAN. „TSV Technology for Millimeter-Wave and Terahertz Design and Applications“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1.2 (02/2011), S. 260–267. ISSN: 2156-3950. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2099731.
- [322] J. KIM, J. S. PAK, J. CHO, E. SONG, J. CHO, H. KIM, T. SONG, J. LEE, H. LEE, K. PARK, S. YANG, M.-S. SUH, K.-Y. BYUN und J. KIM. „High-Frequency Scalable Electrical Model and Analysis of a Through Silicon Via (TSV)“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 181–195. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2101890.

- [323] J. CHO, E. SONG, K. YOON, J. S. PAK, J. KIM, W. LEE, T. SONG, K. KIM, J. LEE, H. LEE, K. PARK, S. YANG, M. SUH, K. BYUN und J. KIM. „Modeling and Analysis of Through-Silicon Via (TSV) Noise Coupling and Suppression Using a Guard Ring“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 220–233. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2101892.
- [324] X. ZHAO, J. MINZ und S. K. LIM. „Low-Power and Reliable Clock Network Design for Through-Silicon Via (TSV) Based 3D ICs“. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 1 (02/2011), S. 247–259. ISSN: 2156-3950, 2156-3985. DOI: 10.1109/TCPMT.2010.2099590.
- [325] A. R. RATHMELL, M. NGUYEN, M. CHI und B. J. WILEY. „Synthesis of Oxidation-Resistant Cupronickel Nanowires for Transparent Conducting Nanowire Networks“. In: *Nano Letters* 12.6 (06/2012), S. 3193–3199. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl301168r.
- [326] A. R. MADARIA, A. KUMAR und C. ZHOU. „Large scale, highly conductive and patterned transparent films of silver nanowires on arbitrary substrates and their application in touch screens“. In: *Nanotechnology* 22.24 (06/2011), S. 245201. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/24/245201.
- [327] A. R. MADARIA, A. KUMAR, F. N. ISHIKAWA und C. ZHOU. „Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique“. In: *Nano Research* 3.8 (07/2010), S. 564–573. ISSN: 1998-0124. DOI: 10.1007/s12274-010-0017-5.
- [328] P. E. LYONS, S. DE, J. ELIAS, M. SCHAMEL, L. PHILIPPE, A. T. BELLEW, J. J. BOLAND und J. N. COLEMAN. „High-Performance Transparent Conductors from Networks of Gold Nanowires“. In: *The Journal of Physical Chemistry Letters* 2.24 (12/2011), S. 3058–3062. ISSN: 1948-7185. DOI: 10.1021/jz201401e.
- [329] A. NAVITSKI, G. MÜLLER, V. SAKHARUK, T. W. CORNELIUS, C. TRAUTMANN und S. KARIM. „Efficient field emission from structured gold nanowire cathodes“. In: *The European Physical Journal Applied Physics* 48.3 (10/2009), S. 30502. ISSN: 1286-0042, 1286-0050. DOI: 10.1051/epjap/2009167.
- [330] A. DANGWAL, C. S. PANDEY, G. MÜLLER, S. KARIM, T. W. CORNELIUS und C. TRAUTMANN. „Field emission properties of electrochemically deposited gold nanowires“. In: *Applied Physics Letters* 92.6 (02/2008), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.2844853.
- [331] P. SERBUN, F. JORDAN, A. NAVITSKI, G. MÜLLER, I. ALBER, M. TOIMIL-MOLARES und C. TRAUTMANN. „Copper nanocones grown in polymer ion-track membranes as field emitters“. In: *The European Physical Journal Applied Physics* 58.1 (03/2012), S. 10402. ISSN: 1286-0042, 1286-0050. DOI: 10.1051/epjap/2012110473.
- [332] F. DAMS, A. NAVITSKI, C. PROMMESBERGER, P. SERBUN, C. LANGER, G. MÜLLER und R. SCHREINER. „Homogeneous Field Emission Cathodes With Precisely Adjustable Geometry Fabricated by Silicon Technology“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* PP.99 (2012), S. 1–6. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/TED.2012.2206598.

-
- [333] L. RISPAL und U. SCHWALKE. „Structural and electrical characterization of carbon nanotube field-effect transistors fabricated by novel self-aligned growth method“. In: *3rd International Conference on Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, 2008. DTIS 2008*. 03/2008, S. 1–5. DOI: 10.1109/DTIS.2008.4540244.
- [334] X. ZHU, Q. LI, D. E. IOANNOU, D. GU, J. E. BONEVICH, H. BAUMGART, J. S. SUEHLE und C. A. RICHTER. „Fabrication, characterization and simulation of high performance Si nanowire-based non-volatile memory cells“. In: *Nanotechnology* 22.25 (06/2011). PMID: 21572210, S. 254020. ISSN: 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/25/254020.
- [335] J. M. KINARET, T. NORD und S. VIEFERS. „A carbon-nanotube-based nanorelay“. In: *Applied Physics Letters* 82 (2003), S. 1287.
- [336] J. E. JANG, S. N. CHA, Y. CHOI, G. A. J. AMARATUNGA, D. J. KANG, D. G. HASKO, J. E. JUNG und J. M. KIM. „Nanoelectromechanical switches with vertically aligned carbon nanotubes“. In: *Applied Physics Letters* 87.16 (10/2005), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.2077858.
- [337] J. CAO, W. A. VITALE und A. M. IONESCU. „Self-Assembled Nano-Electro-Mechanical Tri-State Carbon Nanotube Switches for Reconfigurable Integrated Circuits“. In: *MEMS 2012 Paris*. IEEE, 01/2012. ISBN: 978-978-1-4673-0325-5.
- [338] N. INC. *Nantero-NRAM*. 2012. URL: <http://www.nantero.com/mission.html> (besucht am 07.08.2012).
- [339] M. S. FUHRER, B. M. KIM, T. DÜRKOP und T. BRINTLINGER. „High-Mobility Nanotube Transistor Memory“. In: *Nano Letters* 2.7 (07/2002), S. 755–759. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl025577o.
- [340] L. RISPAL und U. SCHWALKE. „Large-Scale In Situ Fabrication of Voltage-Programmable Dual-Layer High-kappa Dielectric Carbon Nanotube Memory Devices With High On/Off Ratio“. In: *IEEE Electron Device Letters* 29.12 (12/2008), S. 1349–1352. ISSN: 0741-3106. DOI: 10.1109/LED.2008.2005850.
- [341] A. AYARI, P. VINCENT, S. PERISANU, M. CHOUËIB, V. GOUTTENNOIRE, M. BECHELANY, D. CORNU und S. T. PURCELL. „Self-Oscillations in Field Emission Nanowire Mechanical Resonators: A Nanometric dc-ac Conversion“. In: *Nano Letters* 7.8 (08/2007), S. 2252–2257. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl070742r.
- [342] J. SUH, M. D. LAHAYE, P. M. ECHTERNACH, K. C. SCHWAB und M. L. ROUKES. „Parametric Amplification and Back-Action Noise Squeezing by a Qubit-Coupled Nanoresonator“. In: *Nano Letters* 10.10 (10/2010), S. 3990–3994. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl101844r.
- [343] W. XU, J. WONG, C. CHENG, R. JOHNSON und A. SCHERER. „Fabrication of ultrasmall magnets by electroplating“. In: *Journal of Vacuum Science and Technology-Section B-Microelectronics Nanometer Structur* 13.6 (1995), S. 2372–2375.
- [344] R. O'BARR, S. Y. YAMAMOTO, S. SCHULTZ, W. XU und A. SCHERER. „Fabrication and characterization of nanoscale arrays of nickel columns“. In: *The 41st annual conference on magnetism and magnetic materials*. Bd. 81. AIP, 1997, S. 4730–4732. DOI: 10.1063/1.365444.

- [345] A. SAIB, M. DARQUES, L. PIRAUX, D. VANHOENACKER-JANVIER und I. HUYNEN. „Unbiased microwave circulator based on ferromagnetic nanowires arrays of tunable magnetization state“. en. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 38.16 (08/2005), S. 2759. ISSN: 0022-3727. DOI: 10.1088/0022-3727/38/16/003.
- [346] J. SPIEGEL, J. DE LA TORRE, M. DARQUES, L. PIRAUX und I. HUYNEN. „Permittivity Model for Ferromagnetic Nanowired Substrates“. In: *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 17.7 (07/2007), S. 492–494. ISSN: 1531-1309. DOI: 10.1109/LMWC.2007.899303.
- [347] J.-F. ALLAËYS, B. MARCILHAC und J.-C. MAGE. „Influence of track-etching on polycarbonate membrane permittivity“. en. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 40.12 (06/2007), S. 3714. ISSN: 0022-3727. DOI: 10.1088/0022-3727/40/12/026.
- [348] L. PIRAUX, K. RENARD, R. GUILLEMET, S. MÂTÉFI-TEMPFLI, M. MÂTÉFI-TEMPFLI, V. A. ANTOHE, S. FUSIL, K. BOUZEHOUE und V. CROS. „Template-Grown NiFe/Cu/NiFe Nanowires for Spin Transfer Devices“. In: *Nano Letters* 7.9 (09/2007), S. 2563–2567. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl070263s.
- [349] M. DARQUES, J. SPIEGEL, J. DE LA TORRE MEDINA, I. HUYNEN und L. PIRAUX. „Ferromagnetic nanowire-loaded membranes for microwave electronics“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 321.14 (07/2009), S. 2055–2065. ISSN: 0304-8853. DOI: 10.1016/j.jmmm.2008.03.060.
- [350] D. SCHLENKER, N. BOUFERCHA, M. BURGARD, J. SÄGENBARTH, H. SANDMAIER, N. OTHMAN und W. SCHÄFER. *Fluid-Assembly - Selbstmontage von Kleinst-Chips mit Flüssigkeiten - FluidAssem, FKZ 16SV3538*. BMBF Schlussbericht. Stuttgart [u.a.], 2008.
- [351] J. WILDE, M. BIESALSKI und J. RÜHE. *Klebeprozess mit Nanopads für die Mikro-Nano-Integration - Nanopad, FKZ 16SV3552*. BMBF Schlussbericht. Freiburg: Univ., Inst. für Mikrosystemtechnik, 2009.
- [352] M. BIESALSKI. „DOPA funktionalisierte PolymerVesikel auf Oberflächen - auf dem Weg zu bioinspirierten haftbaren Nanopads“. In: *nanotud - Nanotechnik in Chemo- und Biosensorik*. Darmstadt, 03/2009.
- [353] F. I. B. -.-. A. S. -.-. INTEGRATION und T. BRAUN. *Adaption berührungslos induzierter Strukturbildungen mit Nanopartikeln für die Mikro-Nano-AVT - Belmonia, FKZ 163535 – Teilprojekt Nanopartikel gefüllte Polymere mit verbesserten Diffusionsbarrieren für die Aufbau- und Verbindungstechnik - NanoMoist*. BMBF Schlussbericht. Berlin, 2008. URL: <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=4/TTL=1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SRT=YOP&TRM=16SV3535>.
- [354] I. CORPORATION. *NanoFoil and NanoBond*. 2012. URL: <http://www.indium.com/nanofoil/> (besucht am 13.09.2012).
- [355] C. WALK. *InnoJoin GmbH u. Co. KG - Innovative Fügetechnik*. 2012. URL: <http://www.innojoin.de/> (besucht am 18.10.2012).
- [356] R. BOGUE. „Self-assembly: a review of recent developments“. In: *Assembly Automation* 28.3 (2008), S. 211–215. DOI: 10.1108/01445150810889466.
- [357] S. NITTA, S. PONOTH, G. BREZTA, M. COLBURN, L. CLEVENGER, D. HORAK, M. BHUSHAN, J. CASEY, E. CHAN, S. COHEN u. a. „A Multilevel Copper/Low-k/Airgap BEOL Technology“. In: *Advanced Metallization Conference 2007(AMC 2007)*. 2008.

-
- [358] L. CURRANO und W. CHURAMAN. „Energetic Nanoporous Silicon Devices“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 18.4 (08/2009), S. 799–807. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2023883.
- [359] I. N. ROOM US. *IBM Airgap Microprocessor*. 05/2007. URL: <http://www-03.ibm.com/press/us/en/photo/21479.wss> (besucht am 14. 09. 2012).
- [360] *IBM Self Assembly Technology Creates Airgap Microprocessors*. 05/2007. URL: http://www.youtube.com/watch?v=T8p8_zZNJEU&feature=youtube_gdata_player (besucht am 14. 09. 2012).
- [361] K.-J. WOLTER und T. ZERNA. „Trends in der Systemintegration“. In: Dresden, 11/2006.
- [362] A. KEIGLER, K. O'DONNELL, Z. LIU, B. WU und J. TREZZA. „Enabling 3-D Design“. In: *Semiconductor International*, Aug 1 (2007).
- [363] J.-Q. LU. „3-D Hyperintegration and Packaging Technologies for Micro-Nano Systems“. In: *Proceedings of the IEEE* 97.1 (2009), S. 18–30. ISSN: 0018-9219.
- [364] G. BINDER. *Gottlieb Binder GmbH & Co. KG - Klettband, Klettverschluss, Haftverschluss, Befestigungssysteme - Produkte*. de,en,tr. Gottlieb Binder GmbH & Co. KG seit 1798 ein führendes Unternehmen im Bereich der Klettband-, Klettverschluss-, Haftverschluss- und Befestigungssysteme für Industrie, Automobil, Sport und Medizin. URL: <http://www.binder.de/range> (besucht am 19. 11. 2012).
- [365] T. S. A. S.A., T. A. S. FRANCE, S. SINTEF, N. S. B. NV, E. P. F. D. LAUSANNE, H. R. SRL, 3. P. SA, I. T. S. AS, P. I. B.V., C. A. L. ATOMIQUE, C. UNIVERSITY COLLEGE CORK NATIONAL UNIVERSITY OF IRELAND, P. T. G. F. AACHEN, U. UNIVERSITET, U. PADERBORN, I. T. A. AG, I. T. ELEKTRONOWEJ, P. E. N. B.V., I. M. C. VZW, T. U. BERLIN und F. IAF. *3D Integrated Micro/Nano Modules For Easily Adapted Applications - e-CUBES: EU-Projekt im 6. Rahmenprogramm*. 2006. URL: <http://ecubes.epfl.ch> (besucht am 31. 07. 2012).
- [366] S. RENNON, F. KLOPF, J. REITHMAIER und A. FORCHEL. „12 μm long edge-emitting quantum-dot laser“. In: *Electronics Letters* 37.11 (05/2001), S. 690–691. ISSN: 0013-5194. DOI: 10.1049/el:20010488.
- [367] F. KLOPF, R. KREBS, J. REITHMAIER und A. FORCHEL. „High-temperature operating 1.3- μm quantum-dot lasers for telecommunication applications“. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 13.8 (08/2001), S. 764–766. ISSN: 1041-1135. DOI: 10.1109/68.935796.
- [368] R. SCHWERTBERGER, D. GOLD, J. REITHMAIER und A. FORCHEL. „Long-wavelength InP-based quantum-dash lasers“. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 14.6 (06/2002), S. 735–737. ISSN: 1041-1135. DOI: 10.1109/LPT.2002.1003076.
- [369] W. CHERN, K. HSU, I. S. CHUN, B. P. D. AZEREDO, N. AHMED, K.-H. KIM, J.-M. ZUO, N. FANG, P. FERREIRA und X. LI. „Nonlithographic Patterning and Metal-Assisted Chemical Etching for Manufacturing of Tunable Light-Emitting Silicon Nanowire Arrays“. In: *Nano Letters* 10.5 (05/2010), S. 1582–1588. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl903841a.
-

- [370] L. K. TEH, V. FURIN, A. MARTUCCI, M. GUGLIELMI, C. C. WONG und F. ROMANATO. „Electrodeposition of CdSe on nanopatterned pillar arrays for photonic and photovoltaic applications“. In: *Thin Solid Films* 515.15 (2007), 5787–5791.
- [371] C.-M. LIN und W. FANG. „Batch-fabricated flexible carbon nanotubes’ photosensor array“. In: *Nanotechnology* 20.46 (11/2009), S. 465502. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/20/46/465502.
- [372] C.-M. LIN und W. FANG. „Flexible carbon nanotubes photosensor array“. In: *2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. 01/2010, S. 184–187. DOI: 10.1109/MEMSYS.2010.5442534.
- [373] P. LI, K. JIANG, M. LIU, Q. LI, S. FAN und J. SUN. „Polarized incandescent light emission from carbon nanotubes“. In: *Applied Physics Letters* 82.11 (03/2003), S. 1763–1765. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.1558900.
- [374] S. B. SINGER, M. MECKLENBURG, E. R. WHITE und B. C. REGAN. „Polarized light emission from individual incandescent carbon nanotubes“. In: *Physical Review B* 83.23 (06/2011), S. 233404. DOI: 10.1103/PhysRevB.83.233404.
- [375] G. G. FÜR GERÄTEBAU MBH, I. GMBH, MICRO RESIST TECHNOLOGY, A. GMBH, C. GMBH, F. ENAS und T. C. -.-. Z. FÜR MIKROTECHNOLOGIEN. *Nanostrukturierte Oberflächen für steuerbare optische Komponenten - Nano3PT, FKZ 16SV5371-16SV5377*. Berlin, 06/2012. URL: <http://www.vdivde-it.de/anmeldung/mni-mag-2012/vortraege/NANO3PT.pdf>.
- [376] D. V. SELETSKIY, M. P. HASSELBECK, J. G. CEDERBERG, A. KATZENMEYER, M. E. TOIMIL-MOLARES, F. LÉONARD, A. A. TALIN und M. SHEIK-BAHAE. „Efficient terahertz emission from InAs nanowires“. In: *Physical Review B* 84.11 (09/2011), S. 115421. DOI: 10.1103/PhysRevB.84.115421.
- [377] D. J. GARGAS, M. E. TOIMIL-MOLARES und P. YANG. „Imaging Single ZnO Vertical Nanowire Laser Cavities Using UV-laser Scanning Confocal Microscopy“. In: *Journal of the American Chemical Society* 131.6 (02/2009), S. 2125–2127. ISSN: 0002-7863. DOI: 10.1021/ja8092339.
- [378] G. RAČIUKAITIS, E. STANKEVIČIUS, P. GEČYS, M. GEDVILAS, C. BISCHOFF, E. JÄGER, U. UMHOFFER und F. VÖLKLEIN. „Laser Processing by Using Diffractive Optical Laser Beam Shaping“. In: *Journal of Laser Micro/Nanoengineering - JLMN* 6.1 (2011). DOI: 10.2961/jlmn.2011.01.0009.
- [379] X. HU, Q. AN, G. LI, S. TAO und J. LIU. „Imprinted Photonic Polymers for Chiral Recognition“. en. In: *Angewandte Chemie International Edition* 45.48 (2006), 8145–8148. ISSN: 1521-3773. DOI: 10.1002/anie.200601849.
- [380] T. KUSSEROW, N. DHARMARASU, H. HILLMER, T. NAKAMURA, T. HAYAKAWA und B. VEN-GATESAN. „Tailored Stress in InP/GaInAs Layers for InP/Air-Gap DBR-Filters with Photonic Crystals“. In: *IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS and Their Applications Conference, 2006*. 08/2006, S. 88–89. DOI: 10.1109/OMEMS.2006.1708278.

-
- [381] R. ZAMORA, T. KUSSEROW, M. WULF, K. KANWAR, B. WITZIGMANN und H. HILLMER. „Structuring of 2D photonic crystal on InP membranes as polarizing element for optical MEMS based sensor systems“. In: *2010 Seventh International Conference on Networked Sensing Systems (INSS)*. 06/2010, S. 179–182. DOI: 10.1109/INSS.2010.5572160.
- [382] M. DEUBEL, G. V. FREYMANN, M. WEGENER, S. PEREIRA, K. BUSCH und C. M. SOUKOULIS. „Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications“. en. In: *Nature Materials* 3.7 (2004), S. 444–447. ISSN: 1476-1122. DOI: 10.1038/nmat1155.
- [383] S. WONG, M. DEUBEL, F. PÉREZ-WILLARD, S. JOHN, G. A. OZIN, M. WEGENER und G. VON FREYMANN. „Direct Laser Writing of Three- Dimensional Photonic Crystals with a Complete Photonic Bandgap in Chalcogenide Glasses“. en. In: *Advanced Materials* 18.3 (2006), 265–269. ISSN: 1521-4095. DOI: 10.1002/adma.200501973.
- [384] M. DEUBEL, M. WEGENER, S. LINDEN, G. VON FREYMANN und S. JOHN. „3D-2D-3D photonic crystal heterostructures fabricated by direct laser writing“. In: *Optics Letters* 31.6 (03/2006), S. 805–807. DOI: 10.1364/OL.31.000805.
- [385] C.-J. CHIANG, C. ROTHE, M. ROSAMOND, A. GALLANT, E. FERAIN, R. LEGRAS, D. WOOD und A. MONKMAN. „Organic light-emitting diodes incorporating supported nano-templates“. In: (05/2007), 65930R–65930R. DOI: 10.1117/12.722271.
- [386] J. SPANNHAKE, O. SCHULZ, A. HELWIG, A. KREMKOW, G. MÜLLER und T. DOLL. „High-temperature MEMS Heater Platforms: Long-term Performance of Metal and Semiconductor Heater Materials“. In: *Sensors* 6.4 (04/2006), S. 405–419. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s6040405.
- [387] F. KHADEMOLHOSSEINI und M. CHIAO. „A DRY NANOPARTICLE EMBEDDING TECHNIQUE FOR FABRICATION OF MAGNETIC POLYMER MICROPILLARS“. In: *MEMS 2012 Paris*. IEEE, 01/2012. ISBN: 978-978-1-4673-0325-5.
- [388] T. E. FISCHER. *Materials Science for Engineering Students*. London: Academic Press, 2009. ISBN: 978-0-12-373587-4.
- [389] M. RAUBER, W. ENSINGER, C. TRAUTMANN und R. NEUMANN. „Method for manufacturing segmented nanowires for nanowire structural element, involves forming nanowires in nanopores of template by electrochemical deposition, and disintegrating and removing template to expose nanowires“. DE102010053782(A1). CIB: B82B1/00; B82B3/00; B82Y40/00. 06/2012.
- [390] L. JOSEPH, T. HASLING und D. GARMIRE. „Vertically Aligned Carbon Nanotube Array (VANTA) Biosensor for MEMS Lab-on-a-Chip“. In: *Sensors & Transducers Journal* 7.Special Issue (2009), S. 47–55. ISSN: 1726-5479.
- [391] C.-M. LIN, Y.-T. LEE, S.-R. YEH und W. FANG. „Flexible carbon nanotubes electrode array for neural recording“. In: *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International*. 06/2009, S. 2266–2269. DOI: 10.1109/SENSOR.2009.5285600.

-
-
- [392] J. H. KIM, G. WITHEY, C.-H. WU und J. XU. „Carbon Nanotube Array for Addressable Nano-Bioelectronic Transducers“. In: *IEEE Sensors Journal* 11.5 (05/2011), S. 1274–1283. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2088388.
- [393] Y. S. JUNG, W. JUNG, H. L. TULLER und C. A. ROSS. „Nanowire Conductive Polymer Gas Sensor Patterned Using Self-Assembled Block Copolymer Lithography“. In: *Nano Letters* 8.11 (11/2008), S. 3776–3780. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl802099k.
- [394] S. XU, Y. WEI, J. LIU, R. YANG und Z. L. WANG. „Integrated Multilayer Nanogenerator Fabricated Using Paired Nanotip-to-Nanowire Brushes“. In: *Nano Letters* 8.11 (11/2008), S. 4027–4032. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl8027813.
- [395] J. R. OWEN. „Rechargeable lithium batteries“. In: *Chemical Society Reviews* 26.4 (1997), S. 259. ISSN: 0306-0012, 1460-4744. DOI: 10.1039/cs9972600259.
- [396] K. EDSTRÖM, D. BRANDELL, T. GUSTAFSSON und L. NYHOLM. „Electrodeposition as a Tool for 3D Microbattery Fabrication“. In: *Interface-Electrochemical Society* 20.2 (2011), S. 41.
- [397] P. AJAYAN, R. GANAPATHIRAMAN, B. WEI, A. CAO und Y. JUNG. „Directed Assembly of Highly-Organized Carbon Nanotube Architectures“. CIB: undefined ECLA: undefined. 08/2003.
- [398] K. HATA, S. IJIMA, M. YUMURA und D. N. FUTABA. „Single-Layer Carbon Nanotube and Aligned Single-Layer Carbon Nanotube Bulk Structure, and Their Production Process, Production Apparatus and Use“. CIB: undefined ECLA: undefined. 02/2006.
- [399] T. HIRAOKA, T. YAMADA, K. HATA, D. N. FUTABA, H. KURACHI, S. UEMURA, M. YUMURA und S. IJIMA. „Synthesis of Single- and Double-Walled Carbon Nanotube Forests on Conducting Metal Foils“. In: *Journal of the American Chemical Society* 128.41 (10/2006), S. 13338–13339. ISSN: 0002-7863. DOI: 10.1021/ja0643772.
- [400] A. L. M. REDDY, M. M. SHAJUMON, S. R. GOWDA und P. M. AJAYAN. „Coaxial MnO₂/Carbon Nanotube Array Electrodes for High-Performance Lithium Batteries“. In: *Nano Letters* 9.3 (03/2009), S. 1002–1006. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl803081j.
- [401] J. THOMAS, N. PEYGHAMBARIAN, A. PERSOONS, P. GANGOPADHYAY und S. FEILEN. „Nano-Architected Carbon Structures and Methods for Fabricating Same“. CIB: undefined ECLA: undefined. 12/2010.
- [402] G. GEORGE und O. IAN. „Charge Storage Device Architecture for Increasing Energy and Power Density“. CIB: H01G9/155; B82Y99/00 ECLA: B82Y30/00; H01G9/058; H01G9/155; Y02E60/13. 10/2011.
- [403] P. M. AJAYAN, F. S. OU, M. M. SHAJUMON, S. R. GOWDA und A. L. M. REDDY. „Conformal Coating on Nanostructured Electrode Materials for Three-Dimensional Applications“. CIB: undefined ECLA: undefined. 06/2011.

-
- [404] L. DIMESSO, C. FÖRSTER, W. JAEGERMANN, J. P. KHANDER, H. TEMPEL, A. POPP, J. ENGSTLER, J. J. SCHNEIDER, A. SARAPULOVA, D. MIKHAILOVA, L. A. SCHMITT, S. OSWALD und H. EHRENBERG. „Developments in nanostructured LiMPO₄ (M = Fe, Co, Ni, Mn) composites based on three dimensional carbon architecture“. In: *Chemical Society Reviews* 41.15 (2012), S. 5068. ISSN: 0306-0012, 1460-4744. DOI: 10.1039/c2cs15320c.
- [405] H. S. CHOI, T. KIM, J. H. IM und C. R. PARK. „Preparation and electrochemical performance of hyper-networked Li₄ Ti₅ O₁₂ carbon hybrid nanofiber sheets for a battery-supercapacitor hybrid system“. In: *Nanotechnology* 22.40 (10/2011), S. 405402. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/40/405402.
- [406] M. BOEHME. „Prozessentwicklung zur templatgestützten Synthese metalloxi-discher Nanoröhren sowie Exploration zu deren Anwendungspotenzial“. Deutsch. PhD thesis. Darmstadt: TU Darmstadt, 02/2012.
- [407] P. HELM, M. BERGER, G. LANZINGER, I. SCHMIDT, R. THELEN, M. SANSONE, M. FUNK, R. LINDKEN, M. BAUMGÄRTNER, J. WARTMANN, J. SCHULZ, A. ZIELONKA und A. HEINZEL. *Entwicklung einer neuartigen mikrostrukturierten Bipolarplatte auf Basis eines kombinierten Fotolithografie-Galvanotechnikprozesses - FKZ IGF 15976 N. Projektbericht*. 06/2011, S. 95. URL: http://www.veu.de/files/abschlussbericht_15976.pdf.
- [408] G. LANZINGER, M. BAUMGÄRTNER, M. BERGER, P. HELM, J. SCHULZ und J. WARTMANN. „Miniaturisierung durch kombinierte Verfahren“. In: *mo - Magazin für Oberflächentechnik* 66.11 (2012), S. 12–15.
- [409] A. SCHULTZ. *MiCryon Technik GmbH*. URL: <http://www.micryon.de/index.html> (besucht am 17.03.2013).
- [410] R. G. W, L. S. BOK, P. ISRAEL, L. LAURENT und B. PARAG. „Nanodevice Arrays for Electrical Energy Storage, Capture and Management and Method for Their Formation“. CIB: undefined ECLA: undefined. 03/2011.
- [411] A. BURKE. „Ultracapacitors: why, how, and where is the technology“. In: *Journal of Power Sources* 91.1 (11/2000), S. 37–50. ISSN: 0378-7753. DOI: 10.1016/S0378-7753(00)00485-7.
- [412] P. BANERJEE, I. PEREZ, L. HENN-LECORDER, S. B. LEE und G. W. RUBLOFF. „Nanotubular metal-insulator-metal capacitor arrays for energy storage“. en. In: *Nature Nanotechnology* 4.5 (2009), S. 292–296. ISSN: 1748-3387. DOI: 10.1038/nnano.2009.37.
- [413] Y.-J. PARK, J.-M. KIM, Z.-I. WANG und J.-H. BAE. „Flexible supercapacitor, method of manufacturing the same, and device including the flexible supercapacitor“. Publication number: US 2011/0235241 A1 U.S. Classification: 361/502. URL: <http://www.google.com/patents/US20110235241> (besucht am 06.08.2012).
- [414] J. H. PARK, S. H. PARK und T. Y. SHIN. „Electrode for Supercapacitor, Supercapacitor Comprising the Same, and Method for Preparing the Electrode“. CIB: undefined ECLA: undefined. 09/2010.

- [415] F. A. J. Z. KAI und W. QING. „Oriented Nanotube Electrodes for Lithium Ion Batteries and Supercapacitors“. CIB: undefined ECLA: undefined. 08/2009.
- [416] V. BERGER, A.-F. GABRIEL, T. SERGENT, A. TROUET, Y. LARONDELLE und Y.-J. SCHNEIDER. „Interaction of ochratoxin A with human intestinal Caco-2 cells: possible implication of a multidrug resistance-associated protein (MRP2)“. In: *Toxicology Letters* 140–141 (04/2003), S. 465–476. ISSN: 0378-4274. DOI: 10.1016/S0378-4274(03)00043-2.
- [417] A. D. RIEUX, E. G. RAGNARSSON, E. GULLBERG, V. PRÉAT, Y.-J. SCHNEIDER und P. AR-TURSSON. „Transport of nanoparticles across an in vitro model of the human intestinal follicle associated epithelium“. In: *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 25.4–5 (07/2005), S. 455–465. ISSN: 0928-0987. DOI: 10.1016/j.ejps.2005.04.015.
- [418] T. SERGENT, S. GARSOU, A. SCHAUT, S. D. SAEGER, L. PUSSEMIER, C. V. PETEGHEM, Y. LARONDELLE und Y.-J. SCHNEIDER. „Differential modulation of ochratoxin A absorption across Caco-2 cells by dietary polyphenols, used at realistic intestinal concentrations“. In: *Toxicology Letters* 159.1 (10/2005), S. 60–70. ISSN: 0378-4274. DOI: 10.1016/j.toxlet.2005.04.013.
- [419] A. DES RIEUX, V. FIEVEZ, I. THÉATE, J. MAST, V. PRÉAT und Y.-J. SCHNEIDER. „An improved in vitro model of human intestinal follicle-associated epithelium to study nanoparticle transport by M cells“. In: *European Journal of Pharmaceutical Sciences* 30.5 (04/2007), S. 380–391. ISSN: 0928-0987. DOI: 10.1016/j.ejps.2006.12.006.
- [420] A. DES RIEUX, V. FIEVEZ, M. MOMTAZ, C. DETREMBLEUR, M. ALONSO-SANDE, J. VAN GELDER, A. CAUVIN, Y.-J. SCHNEIDER und V. PRÉAT. „Helodermin-loaded nanoparticles: Characterization and transport across an in vitro model of the follicle-associated epithelium“. In: *Journal of Controlled Release* 118.3 (04/2007), S. 294–302. ISSN: 0168-3659. DOI: 10.1016/j.jconrel.2006.12.023.
- [421] F. MATHOT, A. DES RIEUX, A. ARIËN, Y.-J. SCHNEIDER, M. BREWSTER und V. PRÉAT. „Transport mechanisms of mmePEG750P(CL-co-TMC) polymeric micelles across the intestinal barrier“. In: *Journal of Controlled Release* 124.3 (12/2007), S. 134–143. ISSN: 0168-3659. DOI: 10.1016/j.jconrel.2007.09.001.
- [422] V. FIEVEZ, L. PLAPIED, A. DES RIEUX, V. POURCELLE, H. FREICHEL, V. WASCOTTE, M.-L. VANDERHAEGHEN, C. JÉRÔME, A. VANDERPLASSCHEN, J. MARCHAND-BRYNAERT, Y.-J. SCHNEIDER und V. PRÉAT. „Targeting nanoparticles to M cells with non-peptidic ligands for oral vaccination“. In: *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 73.1 (09/2009), S. 16–24. ISSN: 0939-6411. DOI: 10.1016/j.ejpb.2009.04.009.
- [423] L. LEPRINCE, A. DOGIMONT, D. MAGNIN und S. DEMOUSTIER-CHAMPAGNE. „Dexamethasone electrically controlled release from polypyrrole-coated nanostructured electrodes“. In: *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 21.3 (03/2010), S. 925–930. ISSN: 0957-4530, 1573-4838. DOI: 10.1007/s10856-010-4008-6.

-
- [424] E. FERAIN, D. MAGNIN, S. DEMOUSTIER-CHAMPAGNE, M.-A. THIL, J. DELBEKE und I. COLIN. „Drug-Eluting Nanowire Array“. US2010233226 (A1). CIB: A61F2/00; A61K31/573; A61K31/616; A61K31/7088; A61K38/17; A61K38/18; A61K38/43; A61K39/395; A61N1/04; A61P25/06; A61P25/08; A61P25/16; A61P25/18; A61P29/00; A61P3/02; A61P35/00; A61P39/06; C25D5/02. 09/2010.
- [425] S. METZ, C. TRAUTMANN, A. BERTSCH und P. RENAUD. „Flexible microchannels with integrated nanoporous membranes for filtration and separation of molecules and particles“. In: *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002*. 2002, S. 81–84. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984095.
- [426] S. METZ, C. TRAUTMANN, A. BERTSCH und P. RENAUD. „Polyimide microfluidic devices with integrated nanoporous filtration areas manufactured by micromachining and ion track technology“. en. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14.3 (03/2004), S. 324. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/14/3/002.
- [427] M. JUNGBLUT, W. KNOLL, C. THIELEMANN und M. POTTEK. „Triangular neuronal networks on microelectrode arrays: an approach to improve the properties of low-density networks for extracellular recording“. In: *Biomedical Microdevices* 11.6 (2009), S. 1269–1278. ISSN: 1387-2176. DOI: 10.1007/s10544-009-9346-0.
- [428] T.-H. KIM, J.-S. PARK, S. K. CHANG, S. CHOI, J. H. RYU und H.-K. SONG. „The Current Move of Lithium Ion Batteries Towards the Next Phase“. en. In: *Advanced Energy Materials* 2.7 (2012), 860–872. ISSN: 1614-6840. DOI: 10.1002/aenm.201200028.
- [429] L. BOHNE. „Integrierte 3D-Lithium-Ionen-Dünnschichtbatterien: Dünnschichtkathoden auf strukturierten Substraten und elektrochemische Eigenschaften“. Deutsch. PhD thesis. Darmstadt: TU Darmstadt, 04/2012.
- [430] W. WRIGLEY, W. M. HOLLISTER und W. G. DENARD. *Gyroscopic Theory, Design, and Instrumentation*. The M.I.T. Press, 1969. ISBN: 262-23037-2.
- [431] N. BARBOUR und G. SCHMIDT. „Inertial sensor technology trends“. In: *IEEE Sensors Journal* 1.4 (12/2001), S. 332–339. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/7361.983473.
- [432] G. TSCHULENA und F. LÄRMER. „25 Jahre Mikrosystemtechnik-Entwicklungen“. Deutsch. In: *Sensor Magazin* 25.4 (2010), S. 20–23.
- [433] ITRS. *International Technology Roadmap for Semiconductors 2012 Update - Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)*. 2012. URL: <http://www.itrs.net/home.html> (besucht am 19.03.2013).
- [434] ITRS. *International Technology Roadmap for Semiconductors 2012 Update - Overview*. 2012. URL: <http://www.itrs.net/> (besucht am 19.03.2013).
- [435] W. GEIGER. „Mikrotechnische Drehratengyroskope mit hoher Genauigkeit“. Dissertation, Shaker, ISBN 978-3-8322-0393-1. Aachen: Universität Stuttgart, 07/2002.
- [436] C. ACAR und A. SHKEL. *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness*. en. MEMS Reference Shelf. DOI: 10.1007/978-0-387-09536-3. Springer, 10/2008. ISBN: 9780387095356.
- [437] R. G. BALLAS, G. PFEIFER und R. WERTHSCHÜTZKY. *Elektromechanische Systeme der Mikrotechnik und Mechatronik: Dynamischer Entwurf - Grundlagen und Anwendungen*. de. Springer, 04/2009. ISBN: 9783540893172.
-

- [438] W. QU, C. WENZEL und G. GERLACH. „Fabrication of a 3D differential-capacitive acceleration sensor by UV-LIGA“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 77.1 (09/1999), S. 14–20. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(98)00377-X.
- [439] R. REICHENBACH, D. SCHUBERT und G. GERLACH. „Dreiachsiger Beschleunigungs-sensor in Oberflächenmikromechanik (Surface Micromachined Triaxial Accelerometer)“. In: *tm–Technisches Messen/Sensoren, Geräte, Systeme* 70.5/2003 (2003), 225–232.
- [440] L. ROYLANCE und J. ANGELL. „A batch-fabricated silicon accelerometer“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 26.12 (12/1979), S. 1911–1917. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/T-ED.1979.19795.
- [441] H. SEIDEL und L. CSEPREGI. „Design optimization for cantilever-type accelerometers“. In: *Sensors and Actuators* 6.2 (10/1984), S. 81–92. ISSN: 0250-6874. DOI: 10.1016/0250-6874(84)85001-5.
- [442] P. BARTH, F. POURAHMADI, R. MAYER, J. POYDOCK und K. PETERSEN. „A monolithic silicon accelerometer with integral air damping and overrange protection“. In: *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1988. Technical Digest.* 06/1988, S. 35–38. DOI: 10.1109/SOLSEN.1988.26427.
- [443] H. TAKAO, Y. MATSUMOTO, M. ISHIDA, T. NAKAMURA, H. TANAKA und H.-D. SEO. „Three-dimensional vector accelerometer using soi structure for high-temperature use“. en. In: *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)* 79.3 (1996), 61–72. ISSN: 1520-6432. DOI: 10.1002/ecjb.4420790308.
- [444] D. SATCHELL und J. GREENWOOD. „A thermally-excited silicon accelerometer“. In: *Sensors and Actuators* 17.1–2 (05/1989), S. 241–245. ISSN: 0250-6874. DOI: 10.1016/0250-6874(89)80086-1.
- [445] T. ROSZHART, H. JERMAN, J. DRAKE und C. DE COTIIS. „An Inertial-Grade, Micro-machined Vibrating Beam Accelerometer“. In: *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX. Transducers '95.* Bd. 2. 06/1995, S. 656–658. DOI: 10.1109/SENSOR.1995.721917.
- [446] F. RUDOLF, A. JORNOD, J. BERGQVIST und H. LEUTHOLD. „Precision accelerometers with μg resolution“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 21.1–3 (02/1990), S. 297–302. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(90)85059-D.
- [447] T. MINETA, S. KOBAYASHI, Y. WATANABE, S. KANAUCHI, I. NAKAGAWA, E. SUGANUMA und M. ESASHI. „Three-axis capacitive accelerometer with uniform axial sensitivities“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6.4 (12/1996), S. 431–435. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/6/4/010.
- [448] R. PUERS und S. REYNTJENS. „Design and processing experiments of a new miniaturized capacitive triaxial accelerometer“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 68.1-3 (06/1998), S. 324–328. ISSN: 0924-4247. DOI: doi:DOI:10.1016/S0924-4247(98)00032-6.
- [449] S. BEISSNER. „Volumenmikromechanische Inertialsensoren / Stefan Beißner“. Diss. Aachen: TU Braunschweig, Shaker, ISBN 3-8322-3115-3, 2004.

-
- [450] T. KENNY, S. WALTMAN, J. REYNOLDS und W. KAISER. „A micromachined silicon electron tunneling sensor“. In: *IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 1990. Proceedings, An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots*. 02/1990, S. 192–196. DOI: 10.1109/MEMSYS.1990.110275.
- [451] H. K. ROCKSTAD, T. KENNY, J. REYNOLDS, W. KAISER und T. B. GABRIELSON. „A miniature high-sensitivity broad-band accelerometer based on electron tunneling transducers“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 43.1–3 (05/1994), S. 107–114. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(93)00676-U.
- [452] H. K. ROCKSTAD, T. TANG, J. REYNOLDS, T. KENNY, W. KAISER und T. B. GABRIELSON. „A miniature, high-sensitivity, electron tunneling accelerometer“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 53.1–3 (05/1996), S. 227–231. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(96)01128-4.
- [453] C.-H. LIU, A. BARZILAI, J. REYNOLDS, A. PARTRIDGE, T. KENNY, J. GRADE und H. ROCKSTAD. „Characterization of a high-sensitivity micromachined tunneling accelerometer with micro-g resolution“. In: *Microelectromechanical Systems, Journal of* 7.2 (1998), S. 235–244. ISSN: 1057-7157.
- [454] P.-L. CHEN, R. MULLER, R. JOLLY, G. HALAC, R. WHITE, A. ANDREWS, T. LIM und M. MOTAMEDI. „Integrated silicon microbeam PI-FET accelerometer“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 29.1 (01/1982), S. 27–33. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/T-ED.1982.20654.
- [455] D. DeVoe und A. PISANO. „A fully surface-micromachined piezoelectric accelerometer“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 1205–1208 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635423.
- [456] A. KOUREPENIS, A. PETROVICH und M. WEINBERG. „Low cost quartz resonant accelerometer for aircraft inertial navigation“. In: , *1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91*. 06/1991, S. 551–553. DOI: 10.1109/SENSOR.1991.148935.
- [457] E. ABBASPOUR-SANI, R.-S. HUANG und C. YEE KWOK. „A linear electromagnetic accelerometer“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 44.2 (08/1994), S. 103–109. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(94)00792-6.
- [458] K. SATO. „Acceleration sensor“. 6131457. undefined Filing Date: Apr 6, 1999 U.S. Classification: 735/143.1 International Classification: G01P 1500. 10/2000. URL: <http://www.google.com/patents/about?id=PcwEAAAAEBAJ&dq=US+6131457+A> (besucht am 01. 12. 2010).
- [459] K. KWON und S. PARK. „Three axis piezoresistive accelerometer using polysilicon layer“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 1221–1224 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635428.
- [460] D. BURNS, R. HORNING, W. HERB, J. ZOOK und H. GUCKEL. „Resonant Microbeam Accelerometers“. In: *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX. Transducers '95*. Bd. 2. 06/1995, S. 659–662. DOI: 10.1109/SENSOR.1995.721918.
-

- [461] H. SEIDEL, H. RIEDEL, R. KOLBECK, G. MÜCK, W. KUPKE und M. KÖNIGER. „Capacitive silicon accelerometer with highly symmetrical design“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 21.1–3 (02/1990), S. 312–315. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(90)85062-9.
- [462] W. HENRION, L. DiSANZA, M. IP, S. TERRY und H. JERMAN. „Wide dynamic range direct accelerometer“. In: , *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1990. 4th Technical Digest*. 06/1990, S. 153–157. DOI: 10.1109/SOLSEN.1990.109842.
- [463] E. PEETERS, S. VERGOTE, B. PUERS und W. SANSEN. „A highly symmetrical capacitive micro-accelerometer with single degree-of-freedom response“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 2.2 (06/1992), S. 104–112. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/2/2/006.
- [464] N. YAZDI und K. NAJAFI. „An all-silicon single-wafer fabrication technology for precision microaccelerometers“. In: *Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago., 1997 International Conference on*. Bd. 2. 1997, 1181–1184 vol.2.
- [465] C. YEH und K. NAJAFI. „A low-voltage bulk-silicon tunneling-based microaccelerometer“. In: *Electron Devices Meeting, 1995., International*. 12/1995, S. 593–596. DOI: 10.1109/IEDM.1995.499291.
- [466] C. YEH und K. NAJAFI. „A low-voltage tunneling-based silicon microaccelerometer“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 44.11 (11/1997), S. 1875–1882. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/16.641355.
- [467] C. YEH und K. NAJAFI. „Micromachined tunneling accelerometer with a low-voltage CMOS interface circuit“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 1213–1216 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635426.
- [468] A. SELVAKUMAR, F. AYAZI und K. NAJAFI. „A high sensitivity z-axis torsional silicon accelerometer“. In: *Electron Devices Meeting, 1996. IEDM '96., International*. 12/1996, S. 765–768. DOI: 10.1109/IEDM.1996.554092.
- [469] L. C. SPANGLER und C. J. KEMP. „ISAAC: integrated silicon automotive accelerometer“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 54.1–3 (06/1996), S. 523–529. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(95)01193-5.
- [470] B. VAN DRIENHUIZEN, N. MALUF, I. OPRIS und G. KOVACS. „Force-balanced accelerometer with mG resolution, fabricated using Silicon Fusion Bonding and Deep Reactive Ion Etching“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 1229–1230 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635447.
- [471] J. DANIEL, F. MICHEL und G. DELAPIERRE. „Micromachining of quartz and its application to an acceleration sensor“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 23.1–3 (04/1990), S. 971–977. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(90)87071-P.
- [472] C. LU, M. LEMKIN und B. BOSER. „A monolithic surface micromachined accelerometer with digital output“. In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 30.12 (12/1995), S. 1367–1373. ISSN: 0018-9200. DOI: 10.1109/4.482163.

-
- [473] M. LEMKIN, M. ORTIZ, N. WONGKOMET, B. BOSER und J. SMITH. „A 3-axis surface micromachined Sigma; Delta; accelerometer“. In: *Solid-State Circuits Conference, 1997. Digest of Technical Papers. 43rd ISSCC., 1997 IEEE International*. 02/1997, S. 202–203, 457. DOI: 10.1109/ISSCC.1997.585333.
- [474] M. LEMKIN, B. BOSER, D. AUSLANDER und J. SMITH. „A 3-axis force balanced accelerometer using a single proof-mass“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 1185–1188 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635417.
- [475] W. YUN, R. HOWE und P. GRAY. „Surface micromachined, digitally force-balanced accelerometer with integrated CMOS detection circuitry“. In: , *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1992. 5th Technical Digest*. 06/1992, S. 126–131. DOI: 10.1109/SOLSEN.1992.228309.
- [476] J. FRICKE und E. OBERMEIER. „An accelerometer made in a two-layer surface-micromachining technology“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 54.1-3 (06/1996), S. 651–655. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)80032-5.
- [477] I. LEE, G. H. YOON, J. PARK, S. SEOK, K. CHUN und K.-I. LEE. „Development and analysis of the vertical capacitive accelerometer“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 119.1 (03/2005), S. 8–18. ISSN: 0924-4247. DOI: doi:DOI:10.1016/j.sna.2004.06.033.
- [478] S. SHERMAN, W. TSANG, T. CORE, R. PAYNE, D. QUINN, K. CHAU, J. FARASH und S. BAUM. „A low cost monolithic accelerometer; product/technology update“. In: *Electron Devices Meeting, 1992. IEDM '92. Technical Digest., International*. 12/1992, S. 501–504. DOI: 10.1109/IEDM.1992.307410.
- [479] K. H. L. CHAU, S. R. LEWIS, Y. ZHAO, R. T. HOWE, S. F. BART und R. G. MARCHESELLI. „An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-g applications“. In: *Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers' 95)*. 1995, 25–29.
- [480] B. BOSER und R. HOWE. „Surface micromachined accelerometers“. In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 31.3 (03/1996), S. 366–375. ISSN: 0018-9200. DOI: 10.1109/4.494198.
- [481] M. LEMKIN und B. BOSER. „A micromachined fully differential lateral accelerometer“. In: *Custom Integrated Circuits Conference, 1996., Proceedings of the IEEE* 1996. 05/1996, S. 315–318. DOI: 10.1109/CICC.1996.510566.
- [482] T. ROESSIG, R. HOWE, A. PISANO und J. SMITH. „Surface-micromachined resonant accelerometer“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 859–862 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635237.
- [483] Y. OMURA, Y. NONOMURA und O. TABATA. „New resonant accelerometer based on rigidity change“. In: , *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 855–858 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635236.

-
- [484] C. COMI, A. CORIGLIANO, G. LANGFELDER, A. LONGONI, A. TOCCHIO und B. SIMONI. „A Resonant Microaccelerometer With High Sensitivity Operating in an Oscillating Circuit“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 19.5 (10/2010), S. 1140–1152. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2010.2067437.
- [485] R. H. OLSSONIII, K. E. WOJCIECHOWSKI, M. S. BAKER, M. R. TUCK und J. G. FLEMING. „Post-CMOS-Compatible Aluminum Nitride Resonant MEMS Accelerometers“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 18.3 (06/2009), S. 671–678. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2020374.
- [486] R. KUBENA, G. ATKINSON, W. ROBINSON und F. STRATTON. „A new miniaturized surface micromachined tunneling accelerometer“. In: *IEEE Electron Device Letters* 17.6 (06/1996), S. 306–308. ISSN: 0741-3106. DOI: 10.1109/55.496466.
- [487] J. COLE. „A new sense element technology for accelerometer subsystems“. In: , 1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91. 06/1991, S. 93–96. DOI: 10.1109/SENSOR.1991.148808.
- [488] C. BURBAUM, J. MOHR, P. BLEY und W. EHRFELD. „Fabrication of capacitive acceleration sensors by the LIGA technique“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 27.1-3 (05/1991), S. 559–563. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(91)87051-4.
- [489] M. STROHRMANN, P. BLEY, O. FROMHEIN und J. MOHR. „Acceleration sensor with integrated compensation of temperature effects fabricated by the LIGA process“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 42.1-3 (04/1994), S. 426–429. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(94)80026-X.
- [490] O. KRÖMER, O. FROMHEIN, H. GEMMEKE, T. KÜHNER, J. MOHR und M. STROHRMANN. „High-precision readout circuit for LIGA acceleration sensors“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 46.1-3 (01/1995), S. 196–200. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(94)00889-P.
- [491] O. RENKEN und -.-A. U. -.-S. (UNIVERSITÄT BREMEN - INSTITUT FÜR MIKROSENSOREN. *Integrierte Sensoren mittels additiver Mikro-Galvanik-Verfahren für Anwendungen im Automobil - ISAMIG, FKZ 16SV640*. [Elektronische Ressource]. Bremen, 2000.
- [492] A. GRÄSER und U. B. -.-. F. O. P. -.-. I. FÜR AUTOMATISIERUNGSTECHNIK (IAT). *Integrierte Sensoren mittels additiver Mikro-Galvanik-Verfahren für Anwendungen im Automobil - ISAMIG, FKZ 16SV641*. [Elektronische Ressource]. Bremen, 2000.
- [493] T. WINKLER und C. W. G. (CWM). *Integrierte Sensoren mittels additiver Mikro-Galvanik-Verfahren für Anwendungen im Automobil - ISAMIG, FKZ 16SV643*. [Elektronische Ressource]. Chemnitz, 2000.
- [494] S. M. GMBH. *Integrierte Sensoren mittels additiver Mikro-Galvanik-Verfahren für Anwendungen im Automobil - ISAMIG, FKZ 16SV644*. [Elektronische Ressource]. [Dortmund]: STEAG, 2000.
- [495] B. ELSNER und R. B. GMBH. *Integrierte Sensoren mittels additiver Mikro-Galvanik-Verfahren für Anwendungen im Automobil - ISAMIG, FKZ 16SV645*. [Elektronische Ressource]. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 2000.

-
- [496] V. GROSSER und F.-I. FÜR ZUVERLÄSSIGKEIT UND MIKROINTEGRATION (IZM). *Integrierte Sensoren mittels additiver Mikro-Galvanik-Verfahren für Anwendungen im Automobil - ISAMIG, FKZ 16SV642*. [Elektronische Ressource]. Berlin: IZM, 2001.
- [497] W. GÖPEL, J. HESSE und J. N. ZEMEL, Hrsg. *Sensors Set: A Comprehensive Survey*. 1995. ISBN: 9783527265381, 9783527619269.
- [498] N. YAZDI, F. AYAZI und K. NAJAFI. „Micromachined inertial sensors“. In: *Proceedings of the IEEE* 86.8 (1998), S. 1640–1659. ISSN: 0018-9219.
- [499] D. V. DAO, T. TORIYAMA und S. SUGIYAMA. „Noise and frequency analyses of a miniaturized 3-DOF accelerometer utilizing silicon nanowire piezoresistors“. In: *Sensors, 2004. Proceedings of IEEE*. 2004, 1464–1467 vol.3.
- [500] M. ENGESSER, A. FRANKE, M. MAUTE, D. MEISEL und J. KORVINK. „Miniaturization limits of piezoresistive MEMS accelerometers“. In: *Microsystem Technologies* 15.12 (12/2009), S. 1835–1844. DOI: 10.1007/s00542-009-0920-4.
- [501] P. NEUZIL, C. C. WONG und J. REBOUD. „Electrically Controlled Giant Piezoresistance in Silicon Nanowires“. In: *Nano Letters* 10.4 (04/2010), S. 1248–1252. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl9037856.
- [502] J. GRADE, A. BARZILAI, J. REYNOLDS, C.-H. LIU, A. PARTRIDGE, L. MILLER, J. PODOSEK und T. KENNY. „Low frequency drift in tunnel sensors“. In: *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 871–874 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635240.
- [503] R. KNECHTEL, S. DEMPWOLF, S. HERING, T. LINK, M. TRÄCHTLER, J. DEHNERT und D. HOFFMANN. „Acceleration Sensor IP-Blocks for MEMS Foundry Surface Micromachining Process“. In: *Proceedings SENSOR 2011*. Nürnberg, 2011, 271–276.
- [504] S. DEMPWOLF, R. KNECHTEL und U. SCHWARZ. „Ready-To-Use MEMS - Innovations at X-FAB“. In: *Microsystems Technology in Germany 2012* (03/2012), S. 94–95. ISSN: 2191-7183.
- [505] W. FROBENIUS, S. ZEITMAN, M. WHITE, D. O’SULLIVAN und R. HAMEL. „Microminiature ganged threshold accelerometers compatible with integrated circuit technology“. In: *Electron Devices, IEEE Transactions on* 19.1 (1972), S. 37–40. ISSN: 0018-9383.
- [506] J. NOETZEL, T. TØNNESEN, W. BENECKE, J. BINDER und G. MADER. „Quasianalog accelerometer using microswitch array“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 54.1–3 (06/1996), S. 574–578. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)80017-9.
- [507] A. SELVAKUMAR, N. YAZDI und K. NAJAFI. „Low power, wide range threshold acceleration sensing system“. In: *IEEE, The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1996, MEMS '96, Proceedings. 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems'*. 02/1996, S. 186–191. DOI: 10.1109/MEMSYS.1996.493851.
- [508] T. TØNNESEN, O. LÜDTKE, J. NOETZEL, J. BINDER und G. MADER. „Simulation, design and fabrication of electroplated acceleration switches“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 7.3 (09/1997), S. 237–239. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/7/3/042.

-
-
- [509] A. SELVAKUMAR, N. YAZDI und K. NAJAFI. „A wide-range micromachined threshold accelerometer array and interface circuit“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 11 (2001), S. 118.
- [510] T. MATSUNAGA und M. ESASHI. „Acceleration switch with extended holding time using squeeze film effect for side airbag systems“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 100.1 (08/2002), S. 10–17. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(02)00039-0.
- [511] W. MA, Y. ZOHAR und M. WONG. „Design and characterization of inertia-activated electrical micro-switches fabricated and packaged using low-temperature photoresist molded metal-electroplating technology“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13.6 (11/2003), S. 892–899. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/13/6/312.
- [512] S. McNAMARA und Y. B. GIANCHANDANI. „LIGA fabricated 19-element threshold accelerometer array“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 112.1 (04/2004), S. 175–183. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/j.sna.2003.10.064.
- [513] M. I. YOUNIS, R. MILES und D. JORDY. „Investigation of the response of microstructures under the combined effect of mechanical shock and electrostatic forces“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.11 (11/2006), S. 2463–2474. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/16/11/030.
- [514] Z. YANG, G. DING, H. CAI und X. ZHAO. „A MEMS Inertia Switch With Bridge-Type Elastic Fixed Electrode for Long Duration Contact“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 55.9 (09/2008), S. 2492–2497. ISSN: 0018-9383. DOI: 10.1109/TED.2008.927385.
- [515] H. CAI, Z. YANG, G. DING und H. WANG. „Development of a Novel MEMS Inertial Switch With a Compliant Stationary Electrode“. In: *IEEE Sensors Journal* 9.7 (07/2009), S. 801–808. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2009.2022554.
- [516] C. H. J. FOX und D. J. W. HARDIE. „Vibratory Gyroscopic Sensors“. Eng. In: *Symposium Gyro Technology 1984*. Stuttgart, 10/1984, S. 13.0–13.30.
- [517] C. ACAR und A. SHKEL. „Fundamentals of Micromachined Gyroscopes“. In: *MEMS Vibratory Gyroscopes*. MEMS Reference Shelf. DOI: 10.1007/978-0-387-09536-3_2. Springer US, 2009, S. 1–26. ISBN: 978-0-387-09536-3.
- [518] G. H. VOGEL. *Gerthsen Physik*. 20. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 1999. ISBN: 3-540-65479-8.
- [519] D. D. LYNCH. „Inertial Technology for the Future, Part X: Hemispherical resonator gyro“. Hrsg. von R. R. RAGAN. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-20.4 (07/1984), S. 432–433. ISSN: 0018-9251. DOI: 10.1109/TAES.1984.4502062.
- [520] J. BURDESS und T. WREN. „The Theory of a Piezoelectric Disc Gyroscope“. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* AES-22.4 (07/1986), S. 410–418. ISSN: 0018-9251. DOI: 10.1109/TAES.1986.310776.
- [521] I. D. HOPKIN. „Vibrating Gyroscopes“. In: *Symposium Gyro Technology 1997*. Stuttgart, 09/1997, S. 1.0–1.10.

-
- [522] I. D. HOPKIN, C. P. FELL, K. TOWNSEND und T. R. MASON. „Vibrating structure gyroscope“. US Patent 5,932,804. US Patent 5,932,804. 08/1999.
- [523] G. HE und K. NAJAFI. „A single-crystal silicon vibrating ring gyroscope“. In: *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002*. 2002, S. 718–721. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984371.
- [524] I. D. HOPKIN. „Vibrating gyroscopes automotive sensors“. In: *IEEE Colloquium on Automotive Sensors. Digest No. 1994/170*. Solihull, UK, 1994, 1–4.
- [525] K. MAENAKA und T. SHIOZAWA. „A study of silicon angular rate sensors using anisotropic etching technology“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 43.1–3 (05/1994), S. 72–77. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(93)00668-T.
- [526] K. MAENAKA, T. FUJITA, Y. KONISHI und M. MAEDA. „Analysis of a highly sensitive silicon gyroscope with cantilever beam as vibrating mass“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 54.1–3 (06/1996), S. 568–573. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)80016-7.
- [527] J. SÖDERKVIST. „A Sensor Element Intended for a Gyro“. English (EN). WO/1990/010196. 09/1990. URL: <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO1990010196> (besucht am 18.10.2012).
- [528] J. SÖDERKVIST. „Piezoelectric beams and vibrating angular rate sensors“. In: *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on* 38.3 (1991), 271–280. ISSN: 0885-3010.
- [529] J. SÖDERKVIST. „Micromachined gyroscopes“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 43.1–3 (1994), 65–71. ISSN: 0924-4247.
- [530] R. VOSS, K. BAUER, W. FICKER, T. GLEISSNER, W. KUPKE, M. ROSE, S. SASSEN, J. SCHALK, H. SEIDEL und E. STENZEL. „Silicon angular rate sensor for automotive applications with piezoelectric drive and piezoresistive read-out“. In: , 1997 *International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 879–882 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635242.
- [531] S. GÜNTHER. „Entwurf und Charakterisierung von mikromechanischen Drehratensensoren in Silizium“. Diss. Universität des Saarlands, Shaker, ISBN 978-3-8322-5445-2, 2006.
- [532] P. GREIFF, B. BOXENHORN, T. KING und L. NILES. „Silicon monolithic micromechanical gyroscope“. In: , 1991 *International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, 1991. Digest of Technical Papers, TRANSDUCERS '91*. 06/1991, S. 966–968. DOI: 10.1109/SENSOR.1991.149051.
- [533] D. BILLEP. „Modellierung und Simulation eines mikromechanischen Drehratensensors“. de. Diss. TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 2000.
- [534] F. DUAN, J. JIAO, Y. WANG, Y. ZHANG, B. MI, J. LI und Y. WANG. „A novel x-axis tuning fork gyroscope with “8 vertical springs-proofmass” structure on (111) silicon“. In: *Microsystem Technologies* 14.7 (07/2008), S. 1009–1013. DOI: 10.1007/s00542-007-0527-6.

- [535] S. D. ORLOSKY und H. D. MORRIS. „Quartz rotation (rate) sensor“. In: *Proc. Sensor Expo* (1994), 171–177.
- [536] H. XIE und G. FEDDER. „Fabrication, characterization, and analysis of a DRIE CMOS-MEMS gyroscope“. In: *IEEE Sensors Journal* 3.5 (10/2003), S. 622–631. ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/JSEN.2003.817901.
- [537] B.-D. CHOI, S. PARK, H. KO, S.-J. PAIK, Y. PARK, G. LIM, A. LEE, S. C. LEE, W. CARR, D. SETIADI, R. MOZULAY und D.-I. CHO. „The first sub-deg/hr bias stability, silicon-microfabricated gyroscope“. In: *The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. TRANSDUCERS '05*. Bd. 1. 06/2005, 180–183 Vol. 1. DOI: 10.1109/SENSOR.2005.1496388.
- [538] T. HAWKEY, R. TORTI und B. JOHNSON. „Electrostatically controlled micromechanical gyroscope“. US Patent 5,353,656. US Patent 5,353,656. 1994.
- [539] R. P. TORTI, V. GONDHALEKAR, H. TRAN, B. SELFORS, S. BART und B. MAXWELL. „Electrostatically suspended and sensed micromechanical rate gyroscope“. In: *Proc. SPIE 1994 Symp. on Micromachining and Microfabrication*. Austin, TX, 07/1994, S. 27–38. DOI: 10.1117/12.179613.
- [540] R. YATES. „MEMS for sensors and optoelectronics“. In: *EUROPEAN SEMICONDUCTOR* 17 (1995), 33–33. ISSN: 0957-5685.
- [541] F. AYAZI und K. NAJAFI. „Design and fabrication of high-performance polysilicon vibrating ring gyroscope“. In: *Micro Electro Mechanical Systems, 1998. MEMS 98. Proceedings., The Eleventh Annual International Workshop on*. 1998, S. 621–626. ISBN: 1084-6999.
- [542] A. SESHIA, R. HOWE und S. MONTAGUE. „An integrated microelectromechanical resonant output gyroscope“. In: *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002*. 2002, S. 722–726. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984372.
- [543] K. TANAKA, Y. MOCHIDA, M. SUGIMOTO, K. MORIYA, T. HASEGAWA, K. ATSUCHI und K. OHWADA. „A micromachined vibrating gyroscope“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 50.1–2 (08/1995), S. 111–115. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(96)80093-8.
- [544] W. A. CLARK, R. T. HOWE und R. HOROWITZ. „Surface micromachined Z-axis vibratory rate gyroscope“. In: *Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop*. Hilton Head Island, SC, USA, 1996, 283–287.
- [545] Y. OH, B. LEE, S. BAEK, H. KIM, J. KIM, S. KANG und C. SONG. „A surface-micromachined tunable vibratory gyroscope“. In: *Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1997. MEMS '97, Proceedings, IEEE*. 01/1997, S. 272–277. DOI: 10.1109/MEMSYS.1997.581824.
- [546] M. S. KRANZ und G. K. FEDDER. „Micromechanical vibratory rate gyroscopes fabricated in conventional CMOS“. In: *Symposium Gyro Technology*. 1997, 3–3.
- [547] K.-Y. PARK, C.-W. LEE, Y.-S. OH und Y.-H. CHO. „Laterally oscillated and force-balanced micro vibratory rate gyroscope supported by fish-hook-shaped springs“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 64.1 (01/1998), S. 69–76. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(97)01656-7.

-
- [548] W. A. CLARK. „Micromachined Z-axis vibratory rate gyroscope“. US 5992233 A. 11/1999.
- [549] X. JIANG, J. SEEGER, M. KRAFT und B. BOSER. „A monolithic surface micromachined Z-axis gyroscope with digital output“. In: *2000 Symposium on VLSI Circuits, 2000. Digest of Technical Papers*. 2000, S. 16–19. DOI: 10.1109/VLSIC.2000.852839.
- [550] J. GEEN, S. SHERMAN, J. CHANG und S. LEWIS. „Single-chip surface micromachined integrated gyroscope with 50°/h Allan deviation“. In: *Solid-State Circuits, IEEE Journal of* 37.12 (2002), S. 1860–1866. ISSN: 0018-9200.
- [551] H. LUO, X. ZHU, H. LAKDAWALA, L. CARLEY und G. FEDDER. „A copper CMOS-MEMS Z-axis gyroscope“. In: *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002*. 2002, S. 631–634. DOI: 10.1109/MEMSYS.2002.984350.
- [552] B. FOLKMER, W. GEIGER, W. LANG und U. SOBE. „Rotation rate sensor with uncoupled mutually perpendicular primary and ...“. US 6349597B1. 02/2002.
- [553] C. ACAR und A. SHKEL. „Inherently robust micromachined gyroscopes with 2-DOF sense-mode oscillator“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 15.2 (04/2006), S. 380–387. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2006.872224.
- [554] M. F. ZAMAN, A. SHARMA und F. AYAZI. „High Performance Matched-Mode Tuning Fork Gyroscope“. In: *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2006. MEMS 2006 Istanbul*. 2006, S. 66–69. DOI: 10.1109/MEMSYS.2006.1627737.
- [555] A. SHARMA, M. FAISAL ZAMAN und F. AYAZI. „A 0.2deg/hr Micro-Gyroscope with Automatic CMOS Mode Matching“. In: *Solid-State Circuits Conference, 2007. ISSCC 2007. Digest of Technical Papers. IEEE International*. 02/2007, S. 386–610. DOI: 10.1109/ISSCC.2007.373456.
- [556] A. A. TRUSOV, A. R. SCHOFIELD und A. M. SHKEL. „New architectural design of a temperature robust MEMS gyroscope with improved gain-bandwidth characteristics“. In: *Proc. A Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop (Hilton Head Workshop 2008)*. 2008, 14–17.
- [557] K. Y. PARK, H. S. JEONG, S. AN, S. H. SHIN und C. W. LEE. „Lateral gyroscope suspended by two gimbals through high aspect ratio ICP etching“. In: *Proc., IEEE* (1999), 7–10.
- [558] B. SOULOFF. „Integrated surface micromachined gyro and accelerometers for automotive sensor applications“. In: *Advanced Microsystems for Automotive Applications*. Bd. 99. 1999, 262–270.
- [559] C. SHEARWOOD, C. WILLIAMS, P. MELLOR, R. YATES, M. GIBBS und A. MATTINGLEY. „Levitation of a micromachined rotor for application in a rotating gyroscope“. In: *Electronics Letters* 31.21 (10/1995), S. 1845–1846. ISSN: 0013-5194.
- [560] C. WILLIAMS, C. SHEARWOOD, P. MELLOR, A. MATTINGLEY, M. GIBBS und R. YATES. „Initial fabrication of a micro-induction gyroscope“. In: *Microelectronic Engineering* 30.1–4 (01/1996), S. 531–534. ISSN: 0167-9317. DOI: 10.1016/0167-9317(95)00302-9.

- [561] C. SHEARWOOD, K. HO, C. WILLIAMS und H. GONG. „Development of a levitated micromotor for application as a gyroscope“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 83.1–3 (05/2000), S. 85–92. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(00)00292-2.
- [562] F. CUI, W. CHEN, W. ZHANG, Q. XIAO, G. MA und W. LIU. „Design and fabrication of an electrostatically suspended microgyroscope using UV-LIGA technology“. In: *Microsystem Technologies* 15.12 (10/2009), S. 1885–1896. ISSN: 0946-7076. DOI: 10.1007/s00542-009-0924-0.
- [563] M. W. PUTTY und K. NAJAFI. „A micromachined vibrating ring gyroscope“. In: *Tech. Dig. Solid-State Sens. Actuator Workshop*. Hilton Head Island, SC, 06/1994, S. 213–220.
- [564] M. W. PUTTY. „A Micromachined Vibrating Ring Gyroscope“. Diss. Ph.D. dissertation, The University of Michigan, 1995.
- [565] D. SPARKS, S. ZARABADI, J. JOHNSON, Q. JIANG, M. CHIA, O. LARSEN, W. HIGDON und P. CASTILLO-BORELLEY. „A CMOS integrated surface micromachined angular rate sensor: its automotive applications“. In: *Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago, 1997 International Conference on*. Bd. 2. 1997, 851–854 vol.2.
- [566] S. CHANG, M. CHIA, P. CASTILLO-BORELLEY, W. HIGDON, Q. JIANG, J. JOHNSON, L. OBEDIER, M. PUTTY, Q. SHI, D. SPARKS und S. ZARABADI. „An electroformed CMOS integrated angular rate sensor“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 66.1-3 (04/1998), S. 138–143. ISSN: 0924-4247. DOI: doi : DOI : 10.1016/S0924-4247(97)01761-5.
- [567] F. PAOLETTI, M.-A. GRETILLAT und N. DE ROOIJ. „A silicon micromachined vibrating gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation“. In: *IEEE, The Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1996, MEMS '96, Proceedings. 'An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems'*. 02/1996, S. 162–167. DOI: 10.1109/MEMSYS.1996.493847.
- [568] M. LUTZ, W. GOLDERER, J. GERSTENMEIER, J. MAREK, B. MAIHOFFER, S. MAHLER, H. MUNZEL und U. BISCHOF. „A precision yaw rate sensor in silicon micromachining“. In: , 1997 *International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 847–850 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635234.
- [569] S. LEE, S. PARK, J. KIM, S. LEE und D.-I. CHO. „Surface/bulk micromachined single-crystalline-silicon micro-gyroscope“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 9.4 (12/2000), S. 557–567. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/84.896779.
- [570] M. HASHIMOTO, C. CABUZ, K. MINAMI und M. ESASHI. „Silicon resonant angular rate sensor using electromagnetic excitation and capacitive detection“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 5.3 (09/1995), S. 219–225. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/5/3/003.
- [571] R. HULSING. „MEMS inertial rate and acceleration sensor“. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 13.11 (11/1998), S. 17–23. ISSN: 0885-8985. DOI: 10.1109/62.730613.

-
- [572] T. K. TANG, R. C. GUTIERREZ, J. Z. WILCOX, C. STELL, V. VORPERIAN, R. CALVET, W. J. LI, I. CHARKABORTY, R. BARTMAN und W. J. KAISER. „Silicon bulk micromachined vibratory gyroscope“. In: *Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop*. Hilton Head, South Carolina, USA, 06/1996, S. 288–293.
- [573] H. KUISMA, T. RYHANEN, J. LAHDENPERA, E. PUNKKA, S. RUOTSALAINEN, T. SILLANPAA und H. SEPPA. „A bulk micromachined silicon angular rate sensor“. In: , 1997 *International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 875–878 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635241.
- [574] T. TANG, R. GUTIERREZ, C. STELL, V. VORPERIAN, G. ARAKAKI, J. RICE, W. LI, I. CHARKABORTY, K. SHCHEGLOV, J. WILCOX und W. KAISER. „A packaged silicon MEMS vibratory gyroscope for microspacecraft“. In: , *Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1997. MEMS '97, Proceedings, IEEE*. 01/1997, S. 500–505. DOI: 10.1109/MEMSYS.1997.581911.
- [575] B. BOXENHORN und P. GREIFF. „A vibratory micromechanical gyroscope“. en. In: *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*. Bd. -1. 1988, S. 1033–1040.
- [576] P. E. M. [FRERE, P. E. M. CRADDOCK RUSSELL WILLIAM [GB] + (FRERE und R. W. CRADDOCK. „Angular Rate Sensor And Method Of Production Thereof.“ EP0574143 (A1). CIB: G01C19/56; G01P9/04; G01C19/56; G01P9/04; (IPC1-7): G01C19/56 ECLA: ; 12/1993. URL: http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=19931215&CC=EP&NR=0574143A1&KC=A1 (besucht am 18.06.2010).
- [577] J. BERNSTEIN, S. CHO, A. KING, A. KOUREPENIS, P. MACIEL und M. WEINBERG. „A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope“. In: *Micro Electro Mechanical Systems, 1993, MEMS '93, Proceedings An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems. IEEE*. 02/1993, S. 143–148. DOI: 10.1109/MEMSYS.1993.296932.
- [578] D. KARNICK, G. BALLAS, L. KOLAND, M. SECORD, T. BRAMAN und T. KOUREPENIS. „Honeywell gun-hard inertial measurement unit (IMU) development“. In: *Position Location and Navigation Symposium, 2004. PLANS 2004*. 04/2004, S. 49–55. DOI: 10.1109/PLANS.2004.1308973.
- [579] K. FUNK, A. SCHILP, M. OFFENBERG, B. ELSNER und F. LÄRMER. „Surface-micromachining of resonant silicon structures“. In: *Proc. 8th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, Stockholm*. 1995.
- [580] B.-L. LEE, S.-W. LEE, K.-D. JUNG, J.-H. CHOI, T.-R. CHUNG und Y.-C. CHO. „A decoupled vibratory gyroscope using a mixed micro-machining technology“. In: *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*. Bd. 4. 2001, 3412–3416 vol.4. ISBN: 1050-4729.
- [581] H. XIE und G. FEDDER. „A CMOS-MEMS lateral-axis gyroscope“. In: *The 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001*. 2001, S. 162–165. DOI: 10.1109/MEMSYS.2001.906505.
- [582] D. DUNN. „Rotational vibration gyroscope“. CIB: B81B3/00; B81C1/00; G01C19/56; G01P15/18; G01P9/04; (IPC1 ECLA: G01C19/5719; G01P15/18. 04/1996.

- [583] P. GREIFF, B. ANTKOWIAK, J. CAMPBELL und A. PETROVICH. „Vibrating wheel micro-mechanical gyro“. In: *Position Location and Navigation Symposium, 1996., IEEE 1996*. 04/1996, S. 31–37. DOI: 10.1109/PLANS.1996.509053.
- [584] T. JUNEAU und A. P. PISANO. „Micromachined dual input axis angular rate sensor“. In: *Solid-State Sensor and Actuators Workshop, Hilton Head*. 1996.
- [585] T. JUNEAU, A. PISANO und J. SMITH. „Dual axis operation of a micromachined rate gyroscope“. In: *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 883–886 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635243.
- [586] S. AN, Y. OH, B. LEE, K. PARK, S. KANG, S. CHOI, Y. GO und C. SONG. „Dual-axis microgyroscope with closed-loop detection“. In: *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1998. MEMS 98. Proceedings*. 01/1998, S. 328–333. DOI: 10.1109/MEMSYS.1998.659777.
- [587] W. GEIGER, B. FOLKMER, J. MERZ, H. SANDMAIER und W. LANG. „A new silicon rate gyroscope“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 73.1-2 (03/1999), S. 45–51. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(98)00253-2.
- [588] W. GEIGER, W. U. BUTT, A. GAISSE, J. FRECH, M. BRAXMAIER, T. LINK, A. KOHNE, P. NOMMENSEN, H. SANDMAIER, W. LANG und H. SANDMAIER. „Decoupled microgyros and the design principle DAVED“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 95.2-3 (01/2002), S. 239–249. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00732-4.
- [589] N.-C. TSAI, C.-Y. SUE und C.-C. LIN. „Design and fabrication of a novel tri-axis micro-gyroscope“. In: *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2008. NEMS 2008. 3rd IEEE International Conference on*. 2008, S. 457–461.
- [590] Z. Y. GUO, L. T. LIN, Q. C. ZHAO, Z. C. YANG, H. XIE und G. Z. YAN. „A Lateral-Axis Microelectromechanical Tuning-Fork Gyroscope With Decoupled Comb Drive Operating at Atmospheric Pressure“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 19.3 (06/2010), S. 458–468. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2010.2046477.
- [591] T. FUJITA, T. MIZUNO, R. KENNY, K. MAENAKA und M. MAEDA. „Two-dimensional micromachined gyroscope“. In: *1997 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago*. Bd. 2. 06/1997, 887–890 vol.2. DOI: 10.1109/SENSOR.1997.635244.
- [592] C. N. YEH, J. J. TSAI, R. J. SHIEH, F. G. TSENG, C. J. LI und Y. C. SU. „A vertically supported ring-type mems gyroscope utilizing electromagnetic actuation and sensing“. In: *2008 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*. Hong Kong, China, 12/2008, S. 1–4. DOI: 10.1109/EDSSC.2008.4760713.
- [593] M. KANDLER. *MEMS Inertial-Kombisensoren für anspruchsvolle Automobil- und Industrieanwendungen - MEMS Inertial Gyroscopes & Combosensors for high-end industrial, medical and consumer sector applications*. München, 2010.
- [594] A. LAWRENCE. *Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance, and Control*. en. Springer, 1998. ISBN: 9780387985077.

-
- [595] A. HARRIS, J. BURDESS, D. WOOD, J. CRUICKSHANK und G. COOPER. „Vibrating silicon diaphragm micromechanical gyroscope“. In: *Electronics Letters* 31.18 (08/1995), S. 1567–1568. ISSN: 0013-5194. DOI: 10.1049/el:19951070.
- [596] Y.-T. LIAO, W. BIEDERMAN und B. OTIS. „A Fully Integrated CMOS Accelerometer Using Bondwire Inertial Sensing“. In: *Sensors Journal, IEEE* 11.1 (2011), S. 114–122. ISSN: 1530-437X.
- [597] K. PHAN, A. MAURITZ und F. HOMBURG. „A novel elastomer-based magnetoresistive accelerometer“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 145-146 (07/2007), S. 109–115. ISSN: 0924-4247. DOI: 16/j.sna.2007.10.055.
- [598] M. J. MADOU. *Fundamentals of microfabrication - the science of miniaturization*. 2. Aufl. Boca raton: CRC Press, 2002. ISBN: 0-8493-0826-7.
- [599] F. VÖLKLEIN und T. ZETTERER. „Basistechnologien der Mikrosystemtechnik“. In: *Praxiswissen Mikrosystemtechnik*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2006, S. 8–142. ISBN: 978-3-528-13891-2, 978-3-8348-9105-1.
- [600] F. LÄRMER und A. SCHILP. „Verfahren zum anisotropen Ätzen von Silicium“. DE4241045 C1, EP0625285. CIB: undefined ECLA: undefined. 05/1994.
- [601] S. AACHBOUN, P. RANSON, C. HILBERT und M. BOUFNICHEL. „Cryogenic etching of deep narrow trenches in silicon“. In: *The 46th international symposium of the american vacuum society*. Bd. 18. AVS, 2000, S. 1848–1852. DOI: 10.1116/1.582434.
- [602] D. READ. „Tension-tension fatigue of copper thin films“. In: *International Journal of Fatigue* 20.3 (1998), S. 203–209. ISSN: 0142-1123. DOI: 10.1016/S0142-1123(97)00080-7.
- [603] G. ZHANG, C. VOLKERT, R. SCHWAIGER, P. WELLNER, E. ARZT und O. KRAFT. „Length-scale-controlled fatigue mechanisms in thin copper films“. In: *Acta Materialia* 54.11 (06/2006), S. 3127–3139. ISSN: 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat.2006.03.013.
- [604] C. EBERL, R. SPOLENAK, E. ARZT, F. KUBAT, A. LEIDL, W. RUILE und O. KRAFT. „Ultra high-cycle fatigue in pure Al thin films and line structures“. In: *Materials Science and Engineering: A* 421.1–2 (04/2006), S. 68–76. ISSN: 0921-5093. DOI: 10.1016/j.msea.2005.10.007.
- [605] A. SOMA und G. DE PASQUALE. „MEMS Mechanical Fatigue: Experimental Results on Gold Microbeams“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 18.4 (08/2009), S. 828–835. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2009.2024796.
- [606] S. BURGER, C. EBERL, A. SIEGEL, A. LUDWIG und O. KRAFT. „A novel high-throughput fatigue testing method for metallic thin films“. In: *Science and Technology of Advanced Materials* 12.5 (10/2011), S. 054202. ISSN: 1468-6996, 1878-5514. DOI: 10.1088/1468-6996/12/5/054202.
- [607] A. CHOKSHI, A. ROSEN, J. KARCH und H. GLEITER. „On the validity of the hall-petch relationship in nanocrystalline materials“. In: *Scripta Metallurgica* 23.10 (10/1989), S. 1679–1683. ISSN: 0036-9748. DOI: 10.1016/0036-9748(89)90342-6.

- [608] E. ARZT. „Size effects in materials due to microstructural and dimensional constraints: a comparative review“. In: *Acta Materialia* 46.16 (10/1998), S. 5611–5626. ISSN: 1359-6454. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00231-6.
- [609] U. ERB. „Electrodeposited nanocrystals: synthesis, properties and industrial applications“. In: *Nanostructured Materials* 6.5-8 (1995), 533–538.
- [610] W. MILLIGAN. „Mechanical Behavior of Bulk Nanocrystalline and Ultrafine-grain Metals“. In: *Comprehensive Structural Integrity*. Hrsg. von I. MILNE, R. O. RITCHIE, KARIHALOO und B. Fracture of Materials from Nano to Macro 8. Oxford: Pergamon, 2003, S. 529–550. ISBN: 978-0-08-043749-1.
- [611] S. CHENG, J. SPENCER und W. MILLIGAN. „Strength and tension/compression asymmetry in nanostructured and ultrafine-grain metals“. In: *Acta Materialia* 51.15 (09/2003), S. 4505–4518. ISSN: 1359-6454. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00286-6.
- [612] C. CARLTON und P. FERREIRA. „What is behind the inverse Hall–Petch effect in nanocrystalline materials?“ In: *Acta Materialia* 55.11 (06/2007), S. 3749–3756. ISSN: 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat.2007.02.021.
- [613] B. VON BLANCKENHAGEN. „Versetzungen in dünnen Metallschichten“. Dissertation, Univ. Stuttgart. Max-Planck-Inst. für Metallforschung, 2002.
- [614] A. S. SCHNEIDER. „Mechanical properties of small scale BCC metal structures“. Dissertation, Univ. Stuttgart. 07/2010.
- [615] E. BRUDER. „Thermische Stabilität von Stählen mit ultrafeinkörnigen Gradientengefügen und deren mechanische Eigenschaften“. Dissertation. TU Darmstadt, Fachbereich Material- und Geowissenschaften, 01/2011.
- [616] M. CHANG, X. LIU, E.-C. CHANG und J. R. DEKA. „Mechanical Characterization of a Single Gold Nanowire“. In: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 13.8 (08/2013), S. 5832–5839. DOI: 10.1166/jnn.2013.7487.
- [617] D.-L. CHEN und T.-C. CHEN. „Mechanical properties of Au nanowires under uniaxial tension with high strain-rate by molecular dynamics“. In: *Nanotechnology* 16.12 (12/2005), S. 2972–2981. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/16/12/041.
- [618] H. S. PARK und J. A. ZIMMERMAN. „Modeling inelasticity and failure in gold nanowires“. In: *Physical Review B* 72.5 (2005), S. 054106. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.054106.
- [619] B. WU, A. HEIDELBERG, J. J. BOLAND, J. E. SADER, SUN und LI. „Microstructure-Hardened Silver Nanowires“. In: *Nano Letters* 6.3 (2006), S. 468–472. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl052427f.
- [620] V. CIMALLA. *DFG-Projekt im SPP 1165: Nanomechanics with Nanowires*. 2006. URL: <http://gepris.dfg.de/gepris/OCTOPUS/?sessionId=37414FDC752D751B0D078A5A2B865321?module=gepris&task=showDetail&context=projekt&id=26312951> (besucht am 08.11.2012).

-
- [621] J. R. GREER, W. C. OLIVER und W. D. NIX. „Size dependence of mechanical properties of gold at the micron scale in the absence of strain gradients“. In: *Acta Materialia* 53.6 (04/2005), S. 1821–1830. ISSN: 1359-6454. DOI: 10.1016/j.actamat.2004.12.031.
- [622] C. A. VOLKERT, E. T. LILLEODDEN, D. KRAMER und J. WEISSMÜLLER. „Approaching the theoretical strength in nanoporous Au“. In: *Applied Physics Letters* 89.6 (08/2006), pages. ISSN: 00036951. DOI: doi:10.1063/1.2240109.
- [623] H. BEI, S. SHIM, E. GEORGE, M. MILLER, E. HERBERT und G. PHARR. „Compressive strengths of molybdenum alloy micro-pillars prepared using a new technique“. In: *Scripta Materialia* 57.5 (09/2007), S. 397–400. ISSN: 1359-6462. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2007.05.010.
- [624] G. GmbH. *Metall - Mechanische Eigenschaften*. 10/2012. URL: <http://www.goodfellow.com/PDF/TAB002G.pdf> (besucht am 08.11.2012).
- [625] I. CHASIOTIS und W. KNAUSS. „Experimentation at the Micron and Submicron Scale“. In: *Comprehensive Structural Integrity*. Hrsg. von I. MILNE, R. O. RITCHIE, K. RIHALOO und B. Oxford: Pergamon, 2003, S. 41–87. ISBN: 978-0-08-043749-1.
- [626] X. L. FENG, R. HE, P. YANG und M. L. ROUKES. „Very High Frequency Silicon Nanowire Electromechanical Resonators“. In: *Nano Letters* 7.7 (07/2007), S. 1953–1959. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl0706695.
- [627] M. LI, T. S. MAYER, J. A. SIOSS, C. D. KEATING und R. B. BHILADVALA. „Template-Grown Metal Nanowires as Resonators: Performance and Characterization of Dissipative and Elastic Properties“. In: *Nano Letters* 7.11 (11/2007), S. 3281–3284. ISSN: 1530-6984. DOI: 10.1021/nl071416e.
- [628] M. LI, R. B. BHILADVALA, T. J. MORROW, J. A. SIOSS, K.-K. LEW, J. M. REDWING, C. D. KEATING und T. S. MAYER. „Bottom-up assembly of large-area nanowire resonator arrays“. en. In: *Nature Nanotechnology* 3.2 (2008), S. 88–92. ISSN: 1748-3387. DOI: 10.1038/nnano.2008.26.
- [629] Z. L. WANG. *Mechanical properties of nanowires and nanobelts*. English. Hrsg. von J. A. SCHWARZ, C. I. CONTESCU und K. PUTYERA. New York, 2004.
- [630] S. S. VERBRIDGE, J. M. PARPIA, R. B. REICHENBACH, L. M. BELLAN und H. G. CRAIG-HEAD. „High quality factor resonance at room temperature with nanostrings under high tensile stress“. In: *Journal of Applied Physics* 99.12 (06/2006), pages. ISSN: 0021-8979. DOI: 10.1063/1.2204829.
- [631] R. GHISLENI, K. RZEPJEJEWSKA-MALYSKA, L. PHILIPPE, P. SCHWALLER und J. MICHLER. „In situ SEM indentation experiments: Instruments, methodology, and applications“. en. In: *Microscopy Research and Technique* 72.3 (2009), 242–249. ISSN: 1097-0029. DOI: 10.1002/jemt.20677.
- [632] R. XIA, X. LI, Q. QIN, J. LIU und X.-Q. FENG. „Surface effects on the mechanical properties of nanoporous materials“. In: *Nanotechnology* 22.26 (07/2011), S. 265714. ISSN: 0957-4484, 1361-6528. DOI: 10.1088/0957-4484/22/26/265714.

- [633] L. EULER. *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici lattissimo sensu accepti*. Bd. 24. Opera Omnia 1. E65. Lausanne, 1744.
- [634] P. D. W. HAUGER, P. D.-I. W. A. WALL, D. V. MANNL und P. D. M. D. H. C. E. WERNER. „Elastostatik“. de. In: *Aufgaben zu Technische Mechanik 1-3*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, 01/2012, S. 121–237. ISBN: 978-3-642-21185-0, 978-3-642-21186-7.
- [635] D. GROSS, W. HAUGER, J. SCHRÖDER und W. A. WALL, Hrsg. *Technische Mechanik*. 9. Aufl. Bd. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. ISBN: 978-3-540-70762-2.
- [636] R. CHRISTIAN. „The theory of oscillating-vane vacuum gauges“. In: *Vacuum* 16.4 (04/1966), S. 175–178. ISSN: 0042-207X. DOI: 10.1016/0042-207X(66)91162-6.
- [637] M.-H. BAO. *Micro Mechanical Transducers: Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes*. en. Hrsg. von S. MIDDELHOEK. 1. Aufl. Bd. 8. Handbook of Sensors and Actuators. Elsevier, 10/2000. ISBN: 0-444-50558-X.
- [638] Z. KÁDÁR, W. KINDT, A. BOSSCHE und J. MOLLINGER. „Quality factor of torsional resonators in the low-pressure region“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 53.1–3 (05/1996), S. 299–303. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(96)80153-1.
- [639] Z. KÁDÁR, A. BOSSCHE und J. MOLLINGER. „Design of a single-crystal silicon-based micromechanical resonator using finite element simulations“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 47.1–3 (03/1995), S. 623–627. ISSN: 0924-4247. DOI: 10.1016/0924-4247(94)00974-M.
- [640] Z. KÁDÁR. „Integrated Resonant Magnetic Field Sensor“. Eng. Dissertation. TU Delft, 1997.
- [641] P. SLADE und E. TAYLOR. „Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced 0.2 micron - 40 micron electrical contacts“. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 25.3 (09/2002), S. 390–396. ISSN: 1521-3331. DOI: 10.1109/TCAPT.2002.804615.
- [642] F. PASCHEN. „Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz“. en. In: *Annalen der Physik* 273.5 (1889), 69–96. ISSN: 1521-3889. DOI: 10.1002/andp.18892730505.
- [643] O. V. MAKAROVA, D. C. MANCINI, N. MOLDOVAN, R. DIVAN, C. M. TANG, D. G. RYDING und R. H. LEE. „Microfabrication of freestanding metal structures using graphite substrate“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 103.1-2 (2003), 182–186.
- [644] P. MEYER, O. MÄDER, V. SAILE und J. SCHULZ. „Comparison of measurement methods for microsystem components: application to microstructures made by the deep x-ray lithography process (x-ray LIGA)“. en. In: *Measurement Science and Technology* 20.8 (08/2009), S. 084024. ISSN: 0957-0233. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084024.
- [645] P. MEYER, J. SCHULZ und V. SAILE. „Deep X-Ray Lithography“. en. In: *Micromanufacturing Engineering and Technology*. Hrsg. von Y. QIN. Oxford: William Andrew, 07/2010, S. 202–220. ISBN: 9780815519805.

-
- [646] P. MEYER, J. D. CLAVERLEY und R. K. LEACH. „Quality control for deep x-ray lithography (LIGA): a preliminary metrology study“. en. In: *Microsystem Technologies* 18.4 (04/2012), S. 415–421. ISSN: 0946-7076, 1432-1858. DOI: 10.1007/s00542-012-1448-6.
- [647] *LTspice*. 05/2013. URL: <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=LTspice&oldid=119075634> (besucht am 14.06.2013).
- [648] M. STAAB. „Elektrothermisch magnetostatisch bistabiles Mikrorelais für Schaltmatrizen“. Dissertation. Darmstadt: TU Darmstadt / Elektrotechnik und Informationstechnik, 12/2013.
- [649] C. CHEN, R. PLASS, E. NG, S. LEE, S. MEYER, G. PAWLOWSKI und R. BEICA. „Development of thick negative photoresists for electroplating applications“. In: *Advances in Resist Materials and Processing Technology XXV*. Hrsg. von C. L. HENDERSON. Bd. 6923. San Jose, CA, USA: SPIE, 2008, 69233E–8.
- [650] S. LEE, W. SHI, P. MACIEL und S. W. CHA. „Top-edge profile control for SU-8 structural photoresist“. In: *University/Government/Industry Microelectronics Symposium, 2003. Proceedings of the 15th Biennial*. 2003, S. 389–390. DOI: 10.1109/UGIM.2003.1225777.
- [651] V. SAILE, U. WALLRABE, O. TABATA, J. G. KORVINK, O. BRAND, G. K. FEDDER, C. HIEROLD, J. G. KORVINK und O. TABATA, Hrsg. *LIGA and Its Applications*. Bd. 7. Advanced Micro and Nanosystems. Weinheim: Wiley-VCH, 08/2009. ISBN: 9783527316984, 9783527622573.
- [652] D. K.-I. (DKI), H.-Z. B. FÜR MATERIALIEN UND ENERGIE (HZB) und K. I. FÜR TECHNOLOGIE (KIT). *Innovative Resist- und Direkt-LIGA-Technologieentwicklung zur Etablierung einer rentablen Fertigungsmethode für LIGA-Präzisionsteile für KMU auf Basis eines stabil arbeitenden Röntgen-Negativresists - INNOLIGA*, FKZ 16SV3522. Karlsruhe, 2009.
- [653] J. SCHULZ, S. LEMKE, J. MOHR, A. VOIGT, M. WALTER und M. WORGULL. „LIGA-Neues von Tiefenlithographie und Abformung“. In: *MikroSystemTechnik* (2011).
- [654] R. ENGELKE, J. MATHUNI, G. AHRENS, G. GRÜTZNER, M. BEDNARZIK, D. SCHONDELMAIER, B. LÖCHEL, M. GUTSCHE und M. CUCCINELLI. „Untersuchung eines neuen hochproduktiven Plasmaverfahrens zum Entfernen von SU 8 nach der Abformung metallischer LIGAMikroteile“. In: Berlin-Offenbach: VDE Verlag, 2007, S. 139–142.
- [655] R. ENGELKE, J. MATHUNI, G. AHRENS, G. GRUETZNER, M. BEDNARZIK, D. SCHONDELMAIER und B. LOECHEL. „Investigations of SU-8 removal from metallic high aspect ratio microstructures with a novel plasma technique“. In: *Microsystem Technologies* 14.9 (2008), 1607–1612. ISSN: 0946-7076.
- [656] MICRO RESIST TECHNOLOGY GMBH. *Projects | UFER | FKZ 02PG2600*. URL: http://www.microresist.de/projects/ufer_en.htm (besucht am 25.08.2011).
- [657] S. BINDER. *Optimierung von plasmagestützten Polymerentfernungsprozessen*. D. Bachelorarbeit BA 1778. Darmstadt: Institut EMK, 11/2011, S. 78.
-

-
- [658] R. ENGELKE, G. AHRENS und G. GRÜTZNER. „Development of High-Efficient Dry Etching Methods for the Removal of Thick-Layer High-Level-Crosslinked Resist Polymer Systems“. In: *Book of Abstracts on 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology HARMNST 2013*. Berlin, 04/2013, S. 163–164.
- [659] D. HÄNEL. *Molekulare Gasdynamik*. Berlin [u.a.]: Springer, 2004. ISBN: 3-540-44247-2.
- [660] A. DEVICES. *AD7746 | 24-bit, 2 Channel Capacitance to Digital Converter*. 2005. URL: <http://www.analog.com/en/analog-to-digital-converters/capacitance-to-digital-converters/ad7746/products/product.html> (besucht am 16.02.2010).
- [661] R. VOELKEL, U. VOGLER, A. BICH, P. PERNET, K. J. WEIBLE, M. HORNUNG, R. ZOBERBIER, E. CULLMANN, L. STUERZEBECHER und T. HARZENDORF. „Advanced mask aligner lithography: new illumination system“. In: *Opt. Express* 18.20 (2010), 20968–20978.
- [662] S. WINTER, S. WILSON und M. GUTTMANN. „Partielle Resistmetallisierung für hohe Aspektverhältnisse“. In: *Mikroproduktion 7.2* (2009), S. 46–50. ISSN: 1614-4538.
- [663] M. E. MOLARES, V. BUSCHMANN, D. DOBREV, R. NEUMANN, R. SCHOLZ, I. U. SCHUCHERT und J. VETTER. „Single-crystalline copper nanowires produced by electrochemical deposition in polymeric ion track membranes“. In: *Advanced Materials* 13.1 (2001), 62–65. ISSN: 1521-4095.
- [664] G. REINERS. *E-Mail: Re: Eingruppierung Nanodrahtarrays und Nanopilze*. 02/2012.
- [665] C. HAMANN und W. VIELSTICH. *Elektrochemie 3. vollständig überarbeitete Auflage*. Wiley/VCH Verlag, Weinheim, 1998.
- [666] R. FORSTER. „Microelectrodes: new dimensions in electrochemistry“. In: *Chem. Soc. Rev.* 23.4 (1994), 289–297.
- [667] R. PREISSER. *Galvanotechnik in der Halbleitertechnologie*, Vizepräsident Atotech. Institut EMK, 08/2011. URL: <http://www.chemanager-online.com/themen/%20chemikalien-distribution/reinstchemikalien-fuer-die-galvanotechnik>.
- [668] M. X. YANG und N. Y. KOVARSKY. „Anolyte for copper plating“. 7670465. 7670465, U.S. Classification: 204/193. 03/2010. URL: <http://www.google.co.uk/patents/US7670465> (besucht am 24.04.2012).
- [669] R. HOLLMAN, J. ZHANG, Z. LIU und A. KEIGLER. „Electroplated Cu Pillar Feature Effects“. In: Raleigh, North Carolina, 10/2010.
- [670] J. ZHANG, R. HOLLMAN, Z. LIU und A. KEIGLER. „Electroplated Copper Pillar Feature Effects“. In: *Wafer & Device Packaging and Interconnect* 5 (09/2010).
- [671] R. SCHNEIDER. „Verfahren zur elektrolytischen Abscheidung von Metallen aus Elektrolyten mit Prozessorganik“. D, F. EP0746640B1. EP0746640B1. 11/1996.
- [672] N. KANANI und Z. ALI-ABASSI. *Kupferschichten: Abscheidung, Eigenschaften, Anwendungen*. Leuze, 2000. ISBN: 3874801632.

-
- [673] B. Q. WU, Z. LIU, A. KEIGLER und J. HARRELL. „Diffusion boundary layer studies in an industrial wafer plating cell“. In: *Journal of the Electrochemical Society* 152 (2005), S. C272.
- [674] M. GUTTMANN, K. KAISER, S. MUTH, H. MORITZ, R. SCHMIDT, M. ZWANZIG, L. HOFMANN und I. SCHUBERT. „Neues modulares Anlagenkonzept für nasschemische Ätzprozesse und die Wafergalvanoformung= New Plant Designs for Aqueous Etching and Electroforming of Wafers“. In: *Galvanotechnik* 100.11 (2009), 2616–2624.
- [675] P. KUTZSCHBACH. „Ausgewählte Methoden zur Charakterisierung der hydrodynamischen Bedingungen bei der elektrolytischen Metallabscheidung= Selected techniques for characterising hydrodynamic regimes in the electrodeposition of metals“. In: *Galvanotechnik* 96.3 (2005), 560–570. ISSN: 0016-4232.
- [676] H. LIEBSCHER, P. KUTZSCHBACH, C. SCHMIDT, W. REMPT, R. NUTSCH, K.-D. BAUM, U. SCHMIDT, F. TAETZNER und T. KAUEAUF. „Verfahren zur elektrolytischen Metallabscheidung bei erzwungener Konvektion“. DD215589B5. DD215589B5. 11/1984.
- [677] W. MEYER, R. SCHUMACHER, W. DAHMS und R. SCHNEIDER. „Verfahren und Vorrichtung zur elektrolytischen Abscheidung von Metallschichten“. EP0690934B1. EP0690934B1. 10/1996.
- [678] N. SCHWESINGER, C. DEHNE und F. ADLER. „6 Herstellung der Mikrokomponenten“. In: *Lehrbuch Mikrosystemtechnik*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 01/2008, S. 255–469. ISBN: 978-3-486-57929-1, 978-3-486-59411-9.
- [679] T. P. MOFFAT, D. WHEELER, M. D. EDELSTEIN und D. JOSELL. „Superconformal film growth: Mechanism and quantification“. In: *IBM Journal of Research and Development* 49.1 (01/2005), S. 19–36. ISSN: 0018-8646, 0018-8646. DOI: 10.1147/rd.491.0019.
- [680] J. ZHANG, R. HOLLMANN, Z. LIU und A. KEIGLER. „Cu PILLAR ELECTROPLATING PROCESS CONTROL FOR WAFER LEVEL PACKAGING“. In: Santa Clara, 10/2010.
- [681] D. P. BARKEY, J. CALLAHAN, A. KEIGLER, Z. LIU, A. RUFF, J. TREZZA und B. WU. „Reaction Engineering of Through-Chip Via Filling for Wafer-Level 3D Packaging“. In: *Electronic Components and Technology Conference, 2007. ECTC'07. Proceedings*. 57th. 2007, 638–642.
- [682] T. WINTERSTEIN, M. STAAB, D. RIEMER und H. F. SCHLAAK. „Konstruktionskatalog für mechanische, elektrische und magnetische Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel“. In: *MikroSystemTechnik Kongress 2011*. 2011.
- [683] D. POSTL, G. EICHKORN und H. FISCHER. „Zur Thermodynamik und Kinetik von Kristallisationsvorgängen bei der Elektrokristallisation von Kupfer“. In: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 77.1-6 (01/1972), S. 149–162. ISSN: 0942-9352. DOI: 10.1524/zpch.1972.77.1-6.149.
- [684] K. WILLIAMS und R. MULLER. „Etch rates for micromachining processing“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 5.4 (12/1996), S. 256–269. ISSN: 10577157. DOI: 10.1109/84.546406.
- [685] T. W. JELINEK. „Entmetallisieren“. In: *Praktische Galvanotechnik*. 5. Aufl. Saulgau/Württ.: Eugen Leuze Verlag, 1997, S. 484–488. ISBN: 3-87480-108-X.

- [686] K. WILLIAMS, K. GUPTA und M. WASILIK. „Etch rates for micromachining processing-part II“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 12.6 (12/2003), S. 761–778. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2003.820936.
- [687] D. M. KÖHLER. *Ätzverfahren für die Mikrotechnik*. Weinheim: Wiley-VCH, 2005. ISBN: 9783527288694, 9783527602919.
- [688] S. BÜTTGENBACH. *Mikromechanik: Einführung in Technologie und Anwendungen*. German. Stuttgart: Teubner, 1994. ISBN: 3519130718 9783519130710.
- [689] V. CONÉDÉRA, B. L. GOFF und N. FABRE. „Potentialities of a new positive photoresist for the realization of thick moulds“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 9.2 (06/1999), S. 173–175. ISSN: 0960-1317, 1361-6439. DOI: 10.1088/0960-1317/9/2/317.
- [690] A. KOHLSTEDT und H. F. SCHLAACK. „Tiefenlithographieprozess für SU-8-Dickschicht-Funktionsstrukturen auf FR4-Leiterplattenmaterial“. In: *Technologien und Werkstoffe der Mikrosystem- und Nanotechnik (GMM-FB 65)*. Darmstadt: VDE, 05/2010.
- [691] J. SHAW, J. GELORME, N. LABIANCA, W. CONLEY und S. HOLMES. „Negative photoresists for optical lithography“. In: *IBM Journal of Research and Development* 41.1.2 (1997), S. 81–94. ISSN: 0018-8646. DOI: 10.1147/rd.411.0081.
- [692] M. DESPONT, H. LORENZ, N. FAHRNI, J. BRUGGER, P. RENAUD und P. VETTIGER. „High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-uv photoresist for MEMS applications“. In: *Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1997. MEMS '97, Proceedings, IEEE*. 1997, S. 518–522. DOI: 10.1109/ MEMSYS.1997.581916.
- [693] D. W. JOHNSON, J. GOETTERT, V. SINGH und D. YEMANE. „SUEx process optimization for ultra-thick high-aspect ratio LIGA imaging“. In: (03/2011), 79722U–79722U. DOI: 10.1117/12.882872.
- [694] J. GOETTERT, D. JOHNSON, V. SINGH und D. YEMANE. „SUEx - Dry Laminate Resist for Ultra-tall X-ray Lithography Applications“. In: *9th International Workshop on High Aspect Ratio Micro Structure Technology*. HsinChu, Taiwan, 2011.
- [695] D. W. JOHNSON, J. GOETTERT, V. SINGH und D. YEMANE. „Multi-level HAR Microstructures Patterned in SUEx Dry Film“. In: *Book of Abstracts on 10th International Workshop on High Aspect Ratio Micro and Nano System Technology HARMNST 2013*. Berlin, 04/2013, S. 85–86.
- [696] N. WÄNGLER, C. MÜLLER, H. REINECKE, S. BECK, G. AHRENS, A. VOIGT und G. GRÜTZNER. „Neuer hochauflösender und laminierbarer Epoxid-Trockenresistfilm für extreme Schichtdicken“. In: *MikroSystemTechnik* (2011).
- [697] N. WÄNGLER, S. BECK, G. AHRENS, A. VOIGT, G. GRÜTZNER, C. MÜLLER und H. REINECKE. „Ultra thick epoxy-based dry-film resist for high aspect ratios“. In: *Micro-electronic Engineering* 97 (09/2012), S. 92–95. ISSN: 0167-9317. DOI: 10.1016/j.mee.2012.05.002.
- [698] C. H. LEE und K. JIANG. „Fabrication of thick electroforming micro mould using a KMPR negative tone photoresist“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18.5 (05/2008), S. 055032. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/18/5/055032.

-
- [699] Y.-M. SHIN, D. GAMZINA, L. BARNETT, F. YAGHMAIE, A. BAIG und N. LUHMANN. „UV Lithography and Molding Fabrication of Ultrathick Micrometallic Structures Using a KMPR Photoresist“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 19.3 (2010), S. 683–689. ISSN: 1057-7157. DOI: 10.1109/JMEMS.2010.2045880.
- [700] M. CORR *KMPR 1000 Photoresist - MicroChem*. 2013. URL: <http://microchem.com/Prod-KMPR.htm> (besucht am 21.05.2013).
- [701] A. GHANNAM, D. BOURRIER, C. VIALON, J. BOULAY, G. BOUISSE und T. PARRA. „High-Q SU8 based above-IC inductors for RF power devices“. In: *2011 IEEE 11th Topical Meeting on Silicon Monolithic Integrated Circuits in RF Systems (SiRF)*. 2011, S. 25–28. DOI: 10.1109/SIRF.2011.5719307.
- [702] D. BOURRIER, M. DILHAN, A. GHANNAM und H. GRANIER. „Comparisons of the new thick negative resist to Su8 resist“. In: *Proc. SPIE 7972, Advances in Resist Materials and Processing Technology XXVIII, 79722F (April 15, 2011)*; doi:10.1117/12.870496. 03/2011, 79722F–79722F. DOI: 10.1117/12.870496.
- [703] A. GHANNAM, L. OURAK, D. BOURRIER, C. VIALON und T. PARRA. „Efficient low cost process for single step metal forming of 3D interconnected above-IC inductors“. In: *Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), 2011 Proceedings of the European*. 2011, S. 367–370. DOI: 10.1109/ESSDERC.2011.6044158.
- [704] A. GHANNAM, D. BOURRIER, L. OURAK, C. VIALON und T. PARRA. „Low cost 3D multilevel interconnect integration for RF and microwave applications“. In: *Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012 IEEE 62nd*. 2012, S. 1351–1355. DOI: 10.1109/ECTC.2012.6249010.
- [705] L. OURAK, A. GHANNAM, D. BOURRIER, C. VIALON und T. PARRA. „Solenoidal transformers for magnetic materials integration“. In: *Microwave Conference Proceedings (APMC), 2012 Asia-Pacific*. 2012, S. 854–856. DOI: 10.1109/APMC.2012.6421757.
- [706] D. BOURRIER, M. DILHAN, A. GHANNAM, L. OURAK und H. GRANIER. „BPN a new thick negative photoresist with high aspect ratio for MEMS applications“. en. In: *Microsystem Technologies* 19.3 (03/2013), S. 419–423. ISSN: 0946-7076, 1432-1858. DOI: 10.1007/s00542-012-1648-0.
- [707] V. S. RAO, V. KRIPESH, S. W. YOON und A. A. O. TAY. „A thick photoresist process for advanced wafer level packaging applications using JSR THB-151N negative tone UV photoresist“. en. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.9 (09/2006), S. 1841. ISSN: 0960-1317. DOI: 10.1088/0960-1317/16/9/012.
- [708] C.-Y. HSU, L.-T. CHEN, J.-S. CHANG und C.-H. CHU. „A thick photoresist process for open-channel sensing packaging applications by JSR THB-151N negative UV photoresist“. In: *Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology, 2007. IMPACT 2007. International*. 2007, S. 288–291. DOI: 10.1109/IMPACT.2007.4433619.
- [709] P. NIEDERMANN, H. BERTHOU, S. ZWICKL, U. SCHÖNHOLZER, K. MEIER, C. GANTNER und D. KAPP-SCHWOERER. „A novel thick photoresist for microsystem technology“. In: *Microelectronic Engineering* 67–68 (06/2003), S. 259–265. ISSN: 0167-9317. DOI: 10.1016/S0167-9317(03)00185-0.

-
- [710] D. GROSS, P. WRIGGERS und W. HAUGER. *Technische Mechanik*. 7. Aufl. Bd. 4. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2009. ISBN: 978-3-540-89391-2.
- [711] M. MAYR. „Knickung“. In: *Technische Mechanik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 09/2012, S. 353–360. ISBN: 978-3-446-43400-4.
- [712] P. D.-I. G. HOLZMANN, P. D. H. ALTENBACH und P. D.-I. H.-J. DREYER. „Knicken und Beulen“. de. In: *Technische Mechanik Festigkeitslehre*. Vieweg+Teubner Verlag, 01/2012, S. 319–340. ISBN: 978-3-8348-0970-4, 978-3-8348-8101-4.

A Normung in der Nanotechnologie

Die Internationale Standardisierungs-Organisation (ISO) fasst unter dem Begriffsfeld „Nanotechnologien“ die folgenden Punkte zusammen:

1. Das Verständnis und die Kontrolle von Substanzen oder Prozessen auf der Nanoebene, die typischerweise, aber nicht ausschließlich, in einer oder mehreren Dimensionen unterhalb von 100 Nanometern liegen und durch ihre größenabhängigen Effekte in der Regel neue Anwendungen hervorbringen.
2. Die Nutzung von Eigenschaften nanoskaliger Materialien, die sich von den Eigenschaften einzelner Atome, Moleküle und Bulk Materialien unterscheiden und dadurch verbesserte Materialien, Anwendungen und Systeme erzeugen, die diese neuen Eigenschaften anwenden.

Einen wichtigen Schritt in Richtung Vereinheitlichung der Bezeichnungen in der Nanotechnologie gehen die technischen Komitees ISO/TC 229 und IEC/TC 113. Ihre Beachtung in der Wissenschaft ist bisher begrenzt, da die technischen Standards kostenpflichtig sind und es erst seit kurzem eine aussagekräftige Übersicht gibt [77]. Die Struktur dieser Komitees gibt die Gliederung des Themenfelds gut wieder und ist in Abbildung A.1 dargestellt. Darauf aufbauend geben die Abbildungen A.2 – A.4 eine detailliertere Darstellung wieder, die mit Informationen aus [54–63, 65, 85–87] angereichert sind. Abbildung A.5 fasst diese ausführlichen Darstellungen zusammen und ist vor allem für die digitale Fassung dieses Werks als alleinstehendes Dokument der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Neben den Gruppen zu Messtechnik, Gesundheit, Sicherheit, Umwelt und Produktspezifikationen ist eine Gruppe zur Terminologie aktiv. Sie strebt ein Nanotechnologien-Fachwörterverzeichnis als Internationale Technische Spezifikationen an, das den Inhalt des Themenfelds gut umreißt und sich wie folgt gliedert:

1. ISO/TS 80004-1:2010: Kernbegriffe [54]
2. ISO/TS 27687:2009: Nanoobjekte - Nanopartikel, Nanofaser und Nanoplättchen [55], wird in der nächsten Revision umbenannt in ISO/TS 80004-2
3. ISO/TS 80004-3:2010: Kohlenstoff-Nanoobjekte [56]

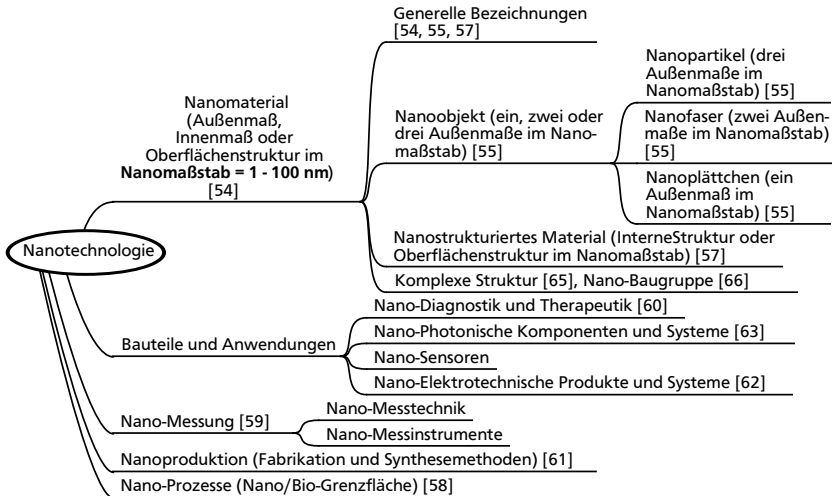


Abbildung A.1: Qualifizierte Übersicht über die Nanotechnologie nach den technischen Spezifikationen der Internationale Organisation für Normung (ISO) in Anlehnung an [65, 75–77].

4. ISO/TS 80004-4:2011-12: Nanostrukturierte Materialien [57]
5. ISO/TS 80004-5:2011-12: Nano/Bio-Grenzfläche [58]
6. ISO/TS 80004-6 (noch nicht erschienen): Nanoscale measurement and instrumentation [59]
7. ISO/TS 80004-7:2011-10: Diagnostik und Therapeutik [60]
8. ISO/TS 80004-8 (noch nicht erschienen): Nanomanufacturing processes [61]
9. ISO/TS 80004-9 (noch nicht erschienen): Electrotechnical products and systems [62]
10. ISO/TS 80004-10 (noch nicht erschienen): Photonic components and systems [63]
11. ISO/TR 14786 (noch nicht erschienen): Framework for nomenclature models for nano-objects [64]

Ein Nanoplättchen unterscheidet sich grundsätzlich nur wenig von einer Schicht im Nanomaßstab. Das Gebiet dünner Schichten besteht allerdings schon sehr lang [82] mit etablierten Bezeichnungen, die nicht neu definiert werden sollen. Um im Nanotechnologie-Fachwörterverzeichnis ISO/TS

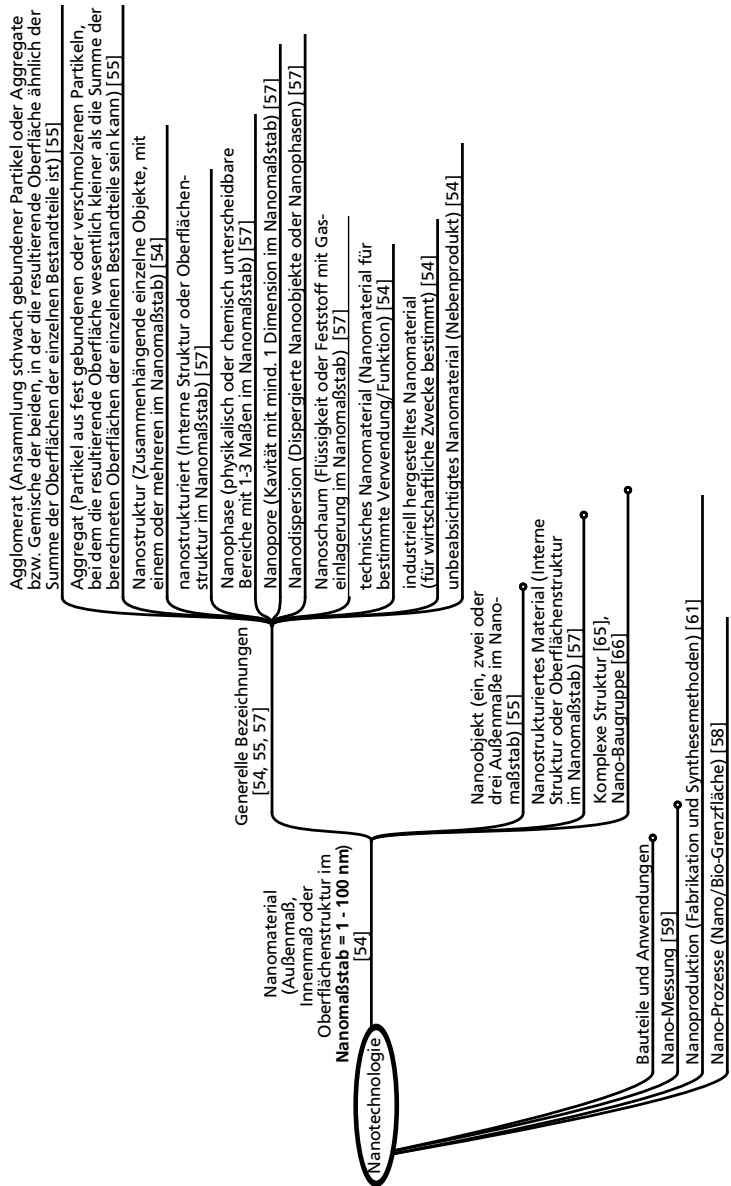


Abbildung A.2: Übersicht über die Nanotechnologie nach ISO/TS – Generelle Bezeichnungen.

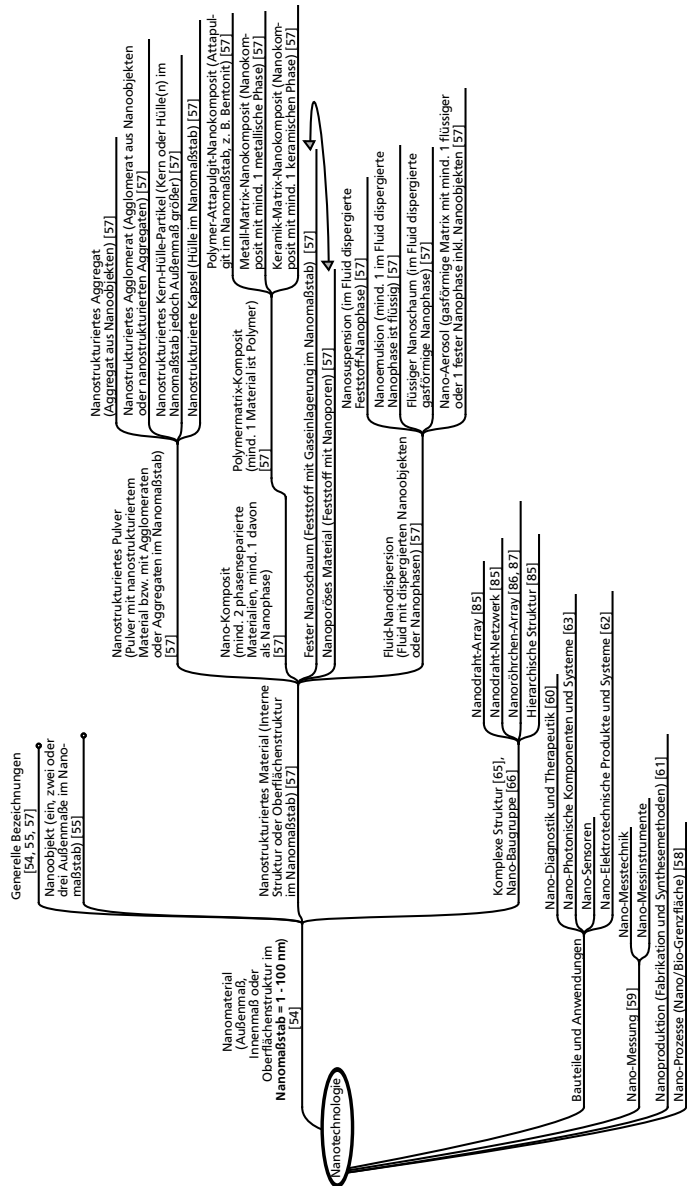


Abbildung A.4: Übersicht über die Nanotechnologie nach ISO/TS – Nanostrukturiertes Material, Komplexe Struktur, Bauteile und Anwendungen.

80004 eine einheitliche Taxonomie einsetzen zu können, bezieht es sich nur auf diskrete Nanoobjekte.

Ein besonderes Augenmerk in dieser Arbeit finden Drähte und Stäbchen. Entscheidend für deren Unterscheidung ist das Aspektverhältnis (Aspect Ratio AR), das definiert ist als das Verhältnis von Länge zu Breite bzw. Länge zu Durchmesser. Ab einem AR von 10:1 soll die Bezeichnung Draht Verwendung finden, darunter Stäbchen.

Die Darstellung ist eine Momentaufnahme, da sich die Normung der Nanotechnologie noch im Aufbau befindet und Revisionen zu Änderungen führen können. So sollten beispielsweise komplexe Strukturen Eingang in die Normung finden (vgl. [65]) und werden unter anderem als Nano-Baugruppe referenziert [66]. Sie konnten jedoch aufgrund ihrer Komplexität bisher bei der Normung nicht berücksichtigt werden. Nach Aussage des Projektleiters der ISO-Gruppe Terminologie, Prof. Reiners, können Nanodraht-Arrays, Nanodraht-Netzwerke und Nanodrähte mit einzelnen Überwachungen als Untergruppe der Nanodrähte oder Nanostäbchen angesehen werden [664].

Übersicht über die Nanotechnologie nach den technischen Spezifikationen der Internationalen Organisation für Normung (ISO)
Dipl.-Ing. Felix Greiner, Technische Universität Darmstadt, 2012, www.emk.tu-darmstadt.de

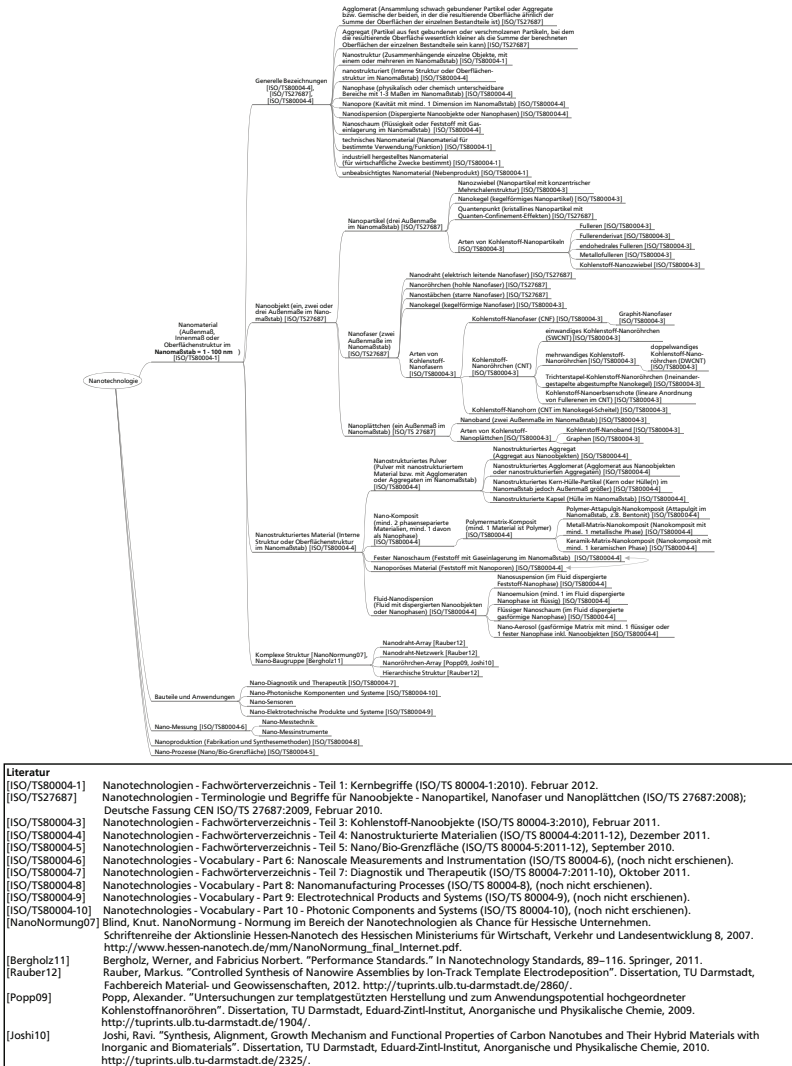


Abbildung A.5: Ausführliche Darstellung der qualifizierten Übersicht über die Nanotechnologie entsprechend Abbildung A.1.



B Top-Down und Bottom-Up

Beispielhaft für die Unterscheidung zwischen den deterministischen Top-Down-Verfahren und den selbstorganisierten Bottom-Up-Verfahren beschreibt Abbildung B.1 verschiedene Verfahren für die Fertigung von Nanostrukturen auf Silizium bzw. Glas. Die Unterteilung in Additiv- und Subtraktiv-Verfahren ließe sich ebenso im Top-Down-Zweig anwenden.

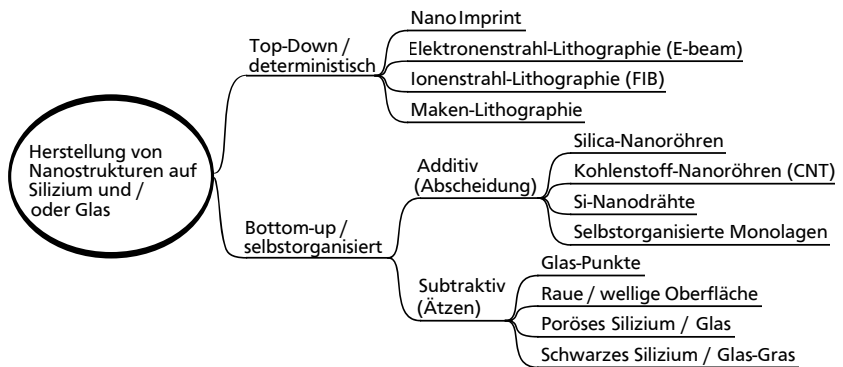


Abbildung B.1: Schema ausgewählter Techniken zur Unterscheidung der Begriffe „Top-Down“ und „Bottom-Up“ nach [199].



C Galvanische Abscheidung

Im Rahmen dieser Arbeit werden metallische Strukturen aus saurem Kupferelektrolyten abgeschieden. Dafür sei vorausgesetzt, dass Leitsalzüberschuss vorliegt und somit Migration eine untergeordnete Rolle beim Stofftransport darstellt. Die hier dargestellten Zusammenhänge gelten größtenteils jedoch auch für andere Elektrolyten zur technischen Abscheidung metallischer Strukturen.

C.1 Modell der Abscheidung und Reaktionshemmungen

Die hydratisierten Metallionen durchlaufen auf ihrem Weg aus dem Elektrolyten zur abgeschiedenen Schicht verschiedene Stufen, vgl. Abbildung C.1 a). Konvektiv gelangen sie aus dem Inneren des Elektrolyten in den Nahbereich der Arbeitselektrode. Dichteunterschiede rufen natürliche Konvektion hervor, technisch bedeutender ist jedoch der Transport durch erzwungene Konvektion mit möglichst starker und homogener Anströmung. Von rechts nach links dargestellt schließt an die hydrodynamische Grenzschicht die Nernstsche Diffusionsschicht an, in der der Gradient der Konzentration den Ionentransport kontrolliert, vgl. Gleichung (2.4). Durch das elektrische Feld angetrieben passieren die Metallionen die Elektrolytische Doppelschicht EDL, vgl. Abbildung C.1 b), und streifen dabei ihre Hydrathülle ab, um als ad-Atome adsorbiert zu werden. Durch Oberflächendiffusion rekombinieren sie zu Atomen, um anschließend auf der Arbeitselektrode als neues Kristall abgeschieden oder in ein Kristallgitter eingebaut zu werden.

Jede Überwindung einer Stufe kann kinetisch gehemmt und damit geschwindigkeitsbestimmend für die gesamte Abscheidung sein. Tabelle C.1 listet die elementaren Gleichungen der Elektrochemie auf, beginnend mit sehr kleinen Abscheideströmen hin zu großen Abscheideströmen: Die hier dargestellte Form der *Butler-Volmer-Gleichung* beschreibt den technischen Strom in Abhängigkeit der Überspannung $\eta = u_{\text{ref}}(i = 0) - u_{\text{ref}}$ nach Abbildung 5.17 a) für sehr kleine Ströme, denn hier kann die Durchtrittsreaktion bestimmend sein. Erweitert man die Gleichung um den Einfluss der Verarmung an der Elektrodenoberfläche, der sich durch Diffusion ausgleicht, erhält man eine um das 1. *Fick'sche Gesetz* erweiterte Darstellung. Sie gilt

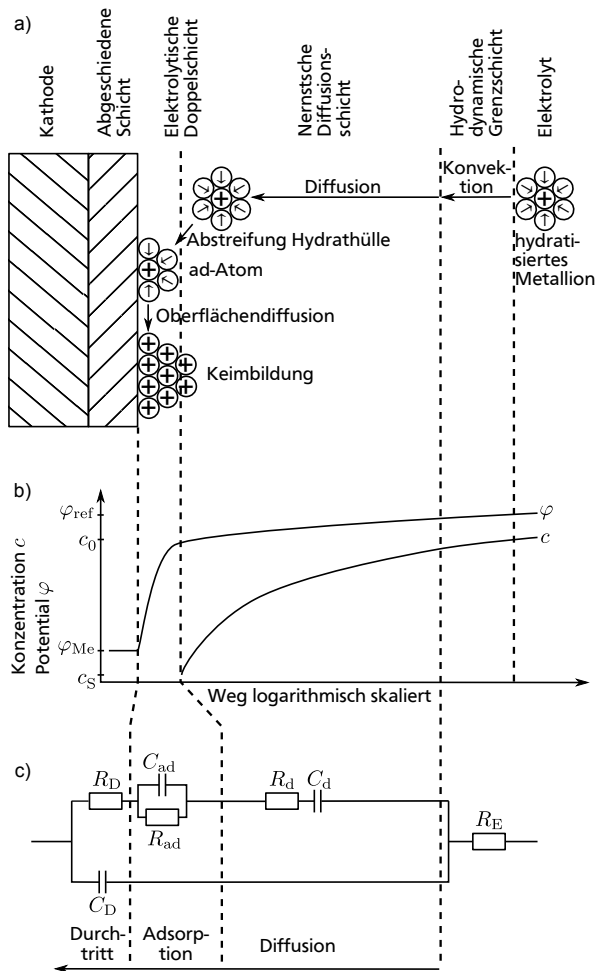


Abbildung C.1: a) Transport des hydratisierten Metallions zur Arbeitselektrode, Abgabe der Hydrathülle, Bildung des ad-Atoms, Entstehung des Kristallkeims und Kristallwachstum auf der abgeschiedenen Schicht [150] (Abschn. 5.2 und 5.4.2), b) Möglicher Konzentrations- und Potentialverlauf, c) Mögliches Ersatzschaltbild für die Reaktionsfolge Diffusion – Adsorption – Durchtritt [665] (Abschn. 5.2.2.7).

für größere Ströme, jedoch unter der Annahme, dass weder Migration noch Konvektion eine Rolle spielen. Interessiert man sich für die maximal möglichen Abscheideströme, gibt die *Nernst-Planck-Gleichung* den Grenzstrom wieder, wobei durch die hohen Ströme die Durchtrittsreaktion vernachlässigt wird.

Den Stufen Reaktionshemmungen zugeordnet lassen sich Überspannungen identifizieren und für einen beispielhaften Elektrolyten quantifizieren, vgl. Tabelle C.2. Je höher die Überspannung, desto langsamer läuft die Teilreaktion ab bzw. um so höher muss die außen an der Zelle angelegte Abscheidenspannung $u(t)$ um den gleichen Abscheidestrom $i(t)$ zu erhalten. In der technischen Anwendung wird die Konzentrationsüberspannung durch hohe Grundkonzentration und gute Anströmung auf sehr geringe Werte reduziert, sodass zumeist Durchtrittsüberspannung und Diffusionsüberspannung die Reaktionsgeschwindigkeit bestimmen. Die Durchtrittsüberspannung beschreibt einen Vorgang, bei dem die Hydrathülle des Metallions verformt bzw. gesprengt wird, sodass das Metallion die Helmholtz-Schicht – den am nächsten an der Kathode gelegenen Teil der EDL – durchquert und der Kathode genügend nahe kommt. Die Elektronen durchtunneln ihrerseits die Helmholtz-Schicht und entladen das Metallion.

Bei schnellen Änderungen des Potentials bzw. des Stroms treten kapazitive Effekte an der Grenzfläche Kathode/Elektrolyt auf. Die größte Kapazität kommt durch die elektrolytische Doppelschicht EDL zustande, da sich hier nicht entladene Metallionen und Elektronen auf großer Fläche nah gegenüber stehen. In Abbildung C.1 c) ist dies modellhaft durch die Durchtrittskapazität C_D der EDL dargestellt.

Die oben genannten Überspannungen gelten unter speziellen Voraussetzungen und lassen sich je nach Anwendungsfall unter Umständen besser durch Widerstände und Kapazitäten ausdrücken, z. B. da sich die Ausbreitung der Diffusionsschicht durch eine große Diffusionskapazität C_d beschreiben lässt. Weitere passive Bauteile im Schaltbild sind der Durchtrittswiderstand R_D , Adsorptions-Widerstand und -Kapazität R_{ad} und C_{ad} sowie Diffusionswiderstand R_d und Elektrolytwiderstand R_E .

Bisher nicht berücksichtigt sind kapazitive Effekte, die durch Deckschichten auftreten können. So kann ein Gasfilm auf der Anode ebenso wie auf der Kathode zu erheblichen Kapazitäten führen, vgl. [665] (Abschn. 5.2.1.1).

Zur zusammenfassenden Klassifizierung der Reaktionshemmungen und damit der Einflüsse auf die Verteilung der lokalen Abscheidengeschwindigkeiten

Tabelle C.1: Elementare Gleichungen der Elektrochemie für die hier verwendete Vorzeichen-Konvention technischer Stromrichtung mit $\eta = u_{\text{ref}}(i = 0) - u_{\text{ref}}$ = Überspannung, j_0 = Austauschstromdichte, A, \vec{A} = Fläche der Arbeitselektrode, α = Symmetriekoeffizient gleichbedeutend mit Durchtrittsfaktor, z = Wertigkeit des Ions, $F = 96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$ = Faraday-Konstante, $R_0 = 8,3145 \frac{\text{J}}{\text{molK}}$ = universelle Gaskonstante, T = Temperatur, $c_{\text{S,red}}$ = Konzentration der reduzierten Spezies an der Elektrodenoberfläche, $c_{0,\text{red}}$ = Konzentration der reduzierten Spezies im Elektrolyten, $c_{\text{S,ox}}$ = Konzentration der oxidierten Spezies an der Elektrodenoberfläche, $c_{0,\text{ox}}$ = Konzentration der oxidierten Spezies im Elektrolyten (z. B. $c_{0,\text{Cu}}$ in Tabelle C.2), c = Konzentration der Ionen, φ = elektrisches Potential, u = Mobilität der Ionen, D = Diffusionskoeffizient, \vec{v} = Ionengeschwindigkeit im bewegten Fluid.

Name	Bedingung für Anwendung	Gleichung
Butler-Volmer	kleine Ströme (rund um $ i = 0$)	Strom bei durchtrittsgehemmter Reaktion
	kleine Ströme	$i_D = j_0 A \left(-e^{\frac{\alpha z F}{R_0 T} \eta} + e^{-\frac{(1-\alpha) z F}{R_0 T} \eta} \right)$
	kleine Ströme und $ \eta < 10 \text{ mV}$	$i_D \approx -j_0 A \frac{z F}{R_0 T} \eta$
	kleine Ströme und $\eta \gg \frac{R_0 T}{F} = 25,2 \text{ mV@}20^\circ\text{C}$	$i_D \approx j_0 A \left(-e^{\frac{\alpha z F}{R_0 T} \eta} \right)$
	kleine Ströme und $\eta \ll -\frac{R_0 T}{F} = -25,2 \text{ mV@}20^\circ\text{C}$	$i_D \approx j_0 A \left(e^{-\frac{(1-\alpha) z F}{R_0 T} \eta} \right)$
Butler-Volmer und 1. Fick'sches Gesetz	kein Einfluss durch Migration oder Konvektion	$i_{D,d} = j_0 A \left(-\frac{c_{\text{S,red}}}{c_{0,\text{red}}} e^{\frac{\alpha z F}{R_0 T} \eta} + \frac{c_{\text{S,ox}}}{c_{0,\text{ox}}} e^{-\frac{(1-\alpha) z F}{R_0 T} \eta} \right)$
Nernst-Planck (2.2)	maximaler Strom ohne Wasserstoff-/Sauerstoff-Abscheidung	$i_{\text{lim}} = z F \vec{A} \left(\underbrace{-z u F c \nabla \varphi}_{\text{Migration}} \underbrace{-D \nabla c}_{\text{Diffusion}} \underbrace{+ c \vec{v}}_{\text{Konvektion}} \right)$

Tabelle C.2: Reaktionshemmungen ausgedrückt durch Überspannungen, [150] (Abschn. 5.4.3), [665] (Abschn. 4.3.1) mit $z = 2$, $j_0 = \frac{i_0}{A} = 0,22 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$, $\alpha = 0,5$, $j = \frac{i}{A} = 10 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$, $c_{0,\text{Cu}} = 40 \frac{\text{g}}{\text{l}} = 630 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$, zurückgesetzte Mikroelektrode nach (2.8) und Abb. 2.13 a) mit $L = 400 \mu\text{m}$ und $r = 20 \mu\text{m}$, $D = 5 \cdot 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$.

Überspannung	Gleichung	Angewandt
Diffusions- überspannung	$\eta_d = \frac{R_0 T}{zF} \ln \frac{c_S}{c_0} =$ $\frac{R_0 T}{zF} \ln \left(1 - \frac{i}{i_{\text{lim}}} \right)$	$\eta_d = -0,9 \text{ mV}$
	Vorgang: Durchqueren der Nernstschen Diffusionsschicht. Annahme: nur Diffusion, $c_S = 0$	
Durchtritts- überspannung	$\eta_D = -\frac{R_0 T}{\alpha zF} \frac{\ln i}{\ln i_0}$	$\eta_D = -38 \text{ mV}$
	Vorgang: Durchqueren der EDL und Entladung.	
Konzentrations- überspannung	$\eta_C =$ $-\frac{R_0 T}{(1-\alpha)zF} \ln \left(\frac{c_0}{c_S} \right)$	$\eta_C = -58 \text{ mV}$ pro Dekade Konzentrationsunterschied zwischen Elektrolyt und Substratoberfläche
	Erweiterung des Modells für die rein kinetisch begründete Durchtrittsüberspannung um in Realität auftretende Konzentrationsunterschiede.	
Widerstands- überspannung	η_W Ohmscher Spannungsabfall außerhalb der EDL z. B. über die Nernstsche Diffusionsschicht, Deckschichten auf Elektroden...	
Reaktions- überspannung	η_R Hydratations- und Dehydratations-Vorgänge, Komplex-Bildung und -Zerfall, Vereinigung von ad-Atomen durch Oberflächendiffusion.	
Kristallisations- überspannung	η_K Keimbildung und Kristallwachstum.	
Gesamt- überspannung	$\eta_{\text{ges}} = \eta_d + \eta_D + \eta_C + \eta_W + \eta_R + \eta_K$ technisch bedeutend: $\eta_{\text{ges}} \approx \eta_d + \eta_D$	

auf einer elektrisch leitfähigen Oberfläche lassen sich verschiedene Stromdichteverteilungen einführen, die sich in der praktischen Anwendung je nach Dominanz der Effekte überlagern [151]:

Primäre Stromdichteverteilung: Der Elektrolytwiderstand R_E und die Zuleitungswiderstände zu den Bereichen der galvanischen Abscheidung sind dominant. Hier spielen vor allem geometrische Effekte wie das Oberflächenprofil der Arbeitselektrode (vgl. Abbildung 2.12), der Gegenelektrode oder elektrische Widerstände metallischer Dünnschichten eine Rolle.

Sekundäre Stromdichteverteilung: Hier ist die Aktivierung dominant, ausgedrückt durch von der Konzentration unabhängige Parameter wie den Durchtrittswiderstand und die Durchtrittskapazität R_D und C_D sowie den Adsorptionswiderstand und die Adsorptionskapazität R_{ad} und C_{ad} , die gemeinsam zur Beschreibung des Lade- und Entladeverhaltens von der Elektrolytischen Doppelschicht dienen können.

Tertiäre Stromdichteverteilung: Hier sind sowohl die Aktivierung als auch der Stofftransport dominant, sodass der Diffusionswiderstand und die Diffusionskapazität R_d und C_d als auch die Konvektionsparameter und deren Auswirkungen beispielsweise auf die Dicke der Nernst'schen Diffusionsschicht δ_N bestimmend sind.

C.2 Abscheidung auf zurückgesetzten Mikroelektroden

Bei der galvanischen Abscheidung auf zurückgesetzten Mikroelektroden nach Abbildung 2.13 a) bestimmt die Diffusion den Stofftransport. Dies erlaubt die Abschätzung einer Zeitkonstante, nach der ein eingeschwungener Zustand vorliegt [666]:

$$T_{\text{einschw}} = \frac{r^2}{\pi D} \quad (\text{C.1})$$

Für die Diffusion von Kupfer in wässriger Lösung gilt $D_{\text{Cu}} \approx 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$ unter Normalbedingungen. Damit ergibt sich für die zurückgesetzten Mikroelektroden mit

- $\varnothing \approx 40 \mu\text{m}$: $T_{\text{einschw}} = 250 \text{ ms}$.

- $\varnothing \approx 1 \text{ mm}$: $T_{\text{einschw}} = 160 \text{ s}$. Hier werden konvektive Effekte eine Rolle spielen, sodass die Aussagekraft der Zeitkonstante eingeschränkt ist.

In technischen Anwendungen haben je etwa gleichen Einfluss auf das Abscheideergebnis [667]:

- Aufbau der Galvanikanlage mit Anströmung, Bewegung der Elektroden und Feldführung
- Geometrie und Materialeigenschaften der Galvanoform mit Strömungswiderständen, Permittivitäten, Leitfähigkeiten und Zustand der galvanischen Startschichten
- Chemie des Elektrolyten mit Konzentrationen der Grundzusammensetzung, der Redoxmediatoren und der Additive

Um eine gleichmäßige Abscheidung bei nah nebeneinander liegenden zurückgesetzten Mikroelektroden mit unterschiedlicher Dimension ($\varnothing \approx 40 \mu\text{m}$ und $\varnothing \approx 1 \text{ mm}$) zu erreichen, sind folgende Ansätze möglich:

1. *Definierte Konvektion*: Die Diffusion in sehr engen Kanälen hin zu sehr kleinen zurückgesetzten Mikroelektroden ist effizient und an den großen zurückgesetzten Mikroelektroden lässt sich der Stofftransport durch natürliche und erzwungene Konvektion erhöhen.
2. *Verwendung eines edlen Redoxmediators an der Arbeitselektrode*: In Bereichen starker Anströmung sinkt die Abscheiderate. Durch gezieltes Austarieren von Anströmung, Abscheidopotential und Konzentrationen im Elektrolyten lässt sich das Ungleichgewicht der Abscheideraten adressieren, wobei die gesamte Stromausbeute sinkt.
3. *Einsatz von Additiven* an der Arbeitselektrode wie in Abbildung 2.7 b) dargestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass Additive möglichst nicht an die Gegenelektrode gelangen, vgl. Abbildung 2.11.
4. Partikelfreie Elektrolytversorgung an der Arbeitselektrode, da jeder Partikel eine Störstelle darstellt, von dem Unebenheiten ausgehen können. Für viele Zwecke sind Anodensäcke aus Textil ausreichend, für höhere Reinheitsansprüche eignen sich Ionenmembranen [668].
5. *Gleichmäßige Belegungsdichte* mit abzuscheidenden Bereichen, da ansonsten die Abscheiderate variiert sowie die Homogenität der Abscheidung sinkt [669] [670].

Die Kombination der Ansätze 2 und 3 ist nicht sinnvoll, da Fe^{3+} oxidativ auf die Additive wirkt und diese zersetzt. Beim Einsatz von Additiven an der Arbeitselektrode ist zu verhindern, dass die Additive mit Fe^{3+} in Berührung kommen [671].

C.2.1 Definierte Konvektion

Die Anlagenkonfiguration für eine homogene Anströmung ist in hohem Maß von der Geometrie der Galvanoform abhängig. In vielen technischen Anwendungen liegen nur gering zurückgesetzte Mikroelektroden vor und die Abscheiderate ist für die Produktivität möglichst hoch einzustellen. Eine starke Anströmung in Richtung der Flächennormale auf das Substrat bei gleichzeitiger Rotation des Substrats wird an vielen Stellen als vorteilhafte Methode für eine kleine Diffusionsschichtdicke beschrieben [150, 151, 154, 665, 672] ebenso wie die Verwendung eines mit etwa 6 Hz vibrierenden Gitters „Shear Plate“ vor dem Substrat [673]. Allerdings bringen viele bewegte Teile hohe Kosten bzw. Nachteile in der Zuverlässigkeit der Anlage mit sich. Ein guter Kompromiss für den Forschungsbetrieb kann eine wohl definierte, homogene Anströmung ohne bewegliche Teile sein [674].

Ein verhältnismäßig geringer anlagentechnischer Aufwand entsteht bei der Nutzung der gravitations-gestützten Galvanik [301]. Hier ist die Arbeitselektrode horizontal am Boden der Galvanikzelle angeordnet wie in Abbildung 2.11 dargestellt. Wird Metall aus dem Elektrolyten abgeschieden, sinkt dessen Dichte und er steigt auf. So können sich laut Modell Wirbel ausbilden, die sich wie im Bénard-Experiment selbst organisieren. Dieses Modell der natürlichen Konvektion verstärkt den Stofftransport in großen zurückgesetzten Mikroelektroden. Steht der Gravitationsvektor senkrecht auf der Arbeitselektrode, ergibt sich keine laterale Vorzugsrichtung der Konvektion wie sie bei erzwungener Konvektion leicht auftreten kann – es sind also gleichmäßigen Abscheideergebnisse bei geringen Grenzstromdichten möglich.

C.2.2 Kathodische und anodische Verwendung eines edlen Redoxmediators

Kommen keine Additive zum Einsatz, kann das Redoxmediatorsystem $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ an der *Arbeitselektrode* Verwendung finden. [675] nutzt dieses

Verfahren, um die Gleichmäßigkeit der Anströmung in Elektrolysezellen über die abgeschiedene Metallschichtdicke zu bestimmen.

Die Umsetzung von Fe^{3+} zu Fe^{2+} läuft an der Arbeitselektrode bei einem wesentlich höheren Normalpotential gegenüber der Wasserstoffelektrode E_h ab als die Umsetzung von Cu^{2+} zu $\text{Cu}^{\pm 0}$:



Dies bedeutet, dass die Reaktion nach Gleichung (C.2) bereits bei niedrigen Spannungen zwischen Referenzelektrode und Arbeitselektrode u_{ref} bzw. niedrigen Stromdichten abläuft und für die Reaktion nach Gleichung (C.3) höhere Spannungen bzw. Stromdichten nötig sind. Abbildung C.2 a) zeigt eine beispielhafte Stromdichte-Potential-Kurve bei niedriger Anströmung. Bei Potentialen $u_{\text{ref}} < -300\text{ mV}$ findet keine Kupferabscheidung statt, sondern lediglich die Reaktion nach Gleichung (C.2). Im Arbeitspunkt bei $u_{\text{ref}} = 65\text{ mV}$ entfallen ca. 60% des Stroms auf die Kupfer-Elektrolyse nach Gleichung (C.3).

Liegt nun höhere Anströmung vor, verändert sich die Stromdichte-Potential-Kurve wie in Abbildung C.2 b) dargestellt. Bei $u_{\text{ref}} = -300\text{ mV}$ ist die Stromdichte höher, der Stoffumsatz nach Gleichung (C.2) also höher. Im Arbeitspunkt bei $u_{\text{ref}} = 65\text{ mV}$ entfallen ca. 40% des Stroms auf die Kupfer-Elektrolyse nach Gleichung (C.3).

Auf Arbeitselektroden mit unterschiedlicher Anströmung lässt sich so die Abscheiderate in wenig angeströmten Bereichen relativ zu stark angeströmten Bereichen erhöhen. So ist es denkbar eine gleichmäßige Abscheidung bei nah nebeneinander liegenden kleinen ($\varnothing \approx 40\text{ }\mu\text{m}$) und großen ($\varnothing \approx 1\text{ mm}$) zurückgesetzten Mikroelektroden zu erreichen.

Unabhängig vom Einsatz von Additiven kann das Redoxmediatorsystem $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ an der *Gegenelektrode* Verwendung finden. In technischen Anlagen ist der Abstand zwischen Arbeits- und Gegenelektrode häufig verhältnismäßig gering gewählt, um hohe Stromdichten und damit große Abscheideraten zu erreichen. Arbeitet man mit löslichen Gegenelektroden, verändert sich durch den Abtrag an der Gegenelektrode der Abstand zur Arbeitselektrode und damit der Arbeitspunkt der Anlage. Hinzu kommt, dass das Austauschen der löslichen Gegenelektrode Stillstandzeiten für die Anlagen bedeutet. Daher ist es für technische Anlagen vorteilhaft, mit inerten Gegenelektroden zu arbeiten – vorzugsweise mit platinisiertem Titan-Streckmetall

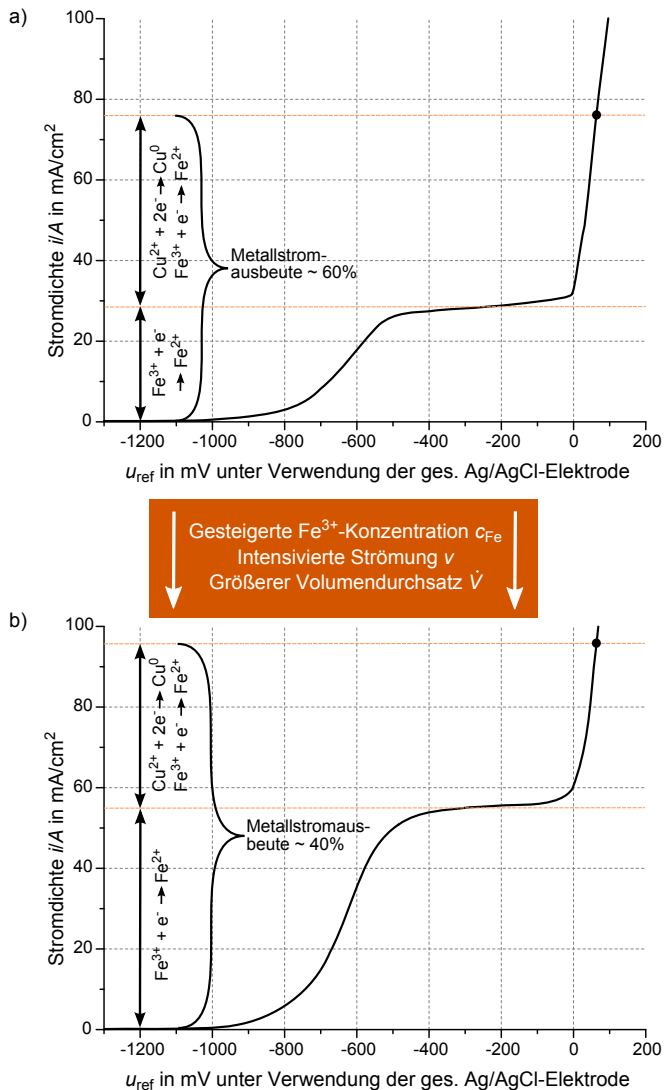
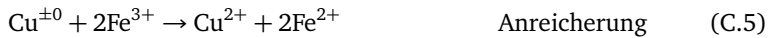
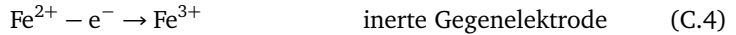


Abbildung C.2: Stromdichte-Potential-Kurve für ein saures Kupferelektrolyt-Bad mit dem Redoxmediatorsystem $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ nach [675] mit der Anströmung v , dem Volumendurchsatz \dot{V} und der Fe^{3+} -Konzentration c_{Fe} ; a): niedrige Werte für $v, \dot{V}, c_{\text{Fe}}$; b) gesteigerte Werte für $v, \dot{V}, c_{\text{Fe}}$.

für eine gute Anströmbbarkeit und geringen Gasbelage bei hohen Stromdichten. Zur Anreicherung des Elektrolyten in einem separaten Behälter mit leicht im Betrieb nachdosierbaren Metallstückchen nach Abbildung 2.11 kann das Redoxmediatorsystem $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ dienen.

An der Gegenelektrode findet nur die Oxidation von Fe^{2+} statt und an den Metallstückchen finden gleichzeitig die Reduktion von Fe^{3+} und die Oxidation von $\text{Cu}^{\pm 0}$ statt [676]:



Legt man die Elektrolytbewegung so aus, dass der Abfluss von der Gegenelektrode nicht an der Arbeitselektrode vorbei führt, lässt sich die Partikelbelastung an der Arbeitselektrode gering halten. Dies lässt sich weiter verbessern, indem zwischen Arbeits- und Gegenelektrode eine Ionenmembran den Elektrolytfluss unterbindet [677].

C.2.3 Einsatz von Additiven

Die Abscheidung von Kupfer lässt sich durch geringe Mengen oberflächenaktive Substanzen sehr stark beeinflussen. Das bedeutet, dass bei Additiv-freier Abscheidung eine sehr saubere Arbeitsweise und regelmäßige Filterung nötig sind. Gleichzeitig bietet sich die gezielte Beeinflussung der Abscheidung für hohe Abscheidekonformität, hohe Abscheideraten und gute Materialeigenschaften an.

Das in Abbildung 2.7 b) dargestellte Beispiel für die galvanische Abscheidung unter Verwendung von Additiven birgt höchste Anforderungen und bietet sich zur anschaulichen Erläuterung der Vorgänge an. Zunächst sei von einer Metallionenkonzentration am Boden der Struktur von $c_s = 0$ und einer maximalen Metallionenkonzentration an der Öffnung des vertikalen Kanals von $c_1 = c_0$ ausgegangen.

Aus der Lösung der beiden Fick'schen Gesetze [678] lassen sich die Diffusionslänge L und die Diffusionszeitkonstante T_{diff} herleiten:

$$L = \sqrt{4Dt} \quad (\text{C.6})$$

$$\Leftrightarrow T_{\text{diff}} = \frac{L^2}{4D} \quad (\text{C.7})$$

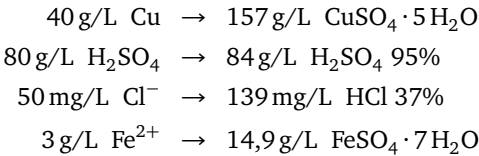
Für verschiedene Anwendungen ergeben sich somit stark unterschiedliche Zeitkonstanten T_{diff} für die Diffusion von Kupfer mit $D_{\text{Cu}} \approx 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$, siehe Tabelle C.3. Die Diffusionskoeffizienten der Additive unterscheiden sich wesentlich von D_{Cu} , die Zeitkonstanten T_{diff} skalieren jedoch analog mit der Tiefe der Struktur L .

Tabelle C.3: Diffusionszeitkonstanten T_{diff} für um L unterschiedlich stark zurückgesetzte Mikroelektroden [133].

L	T_{diff}	Anwendung
0,5 μm	62,5 μs	Damaszen-Strukturen
20 μm	100 ms	Via First-Strukturen
100 μm	2,5 s	Si-Interposer- und Via Last-Strukturen, für den Prozess-Strang <i>Röntgen LIGA</i> betrachtet
400 μm	40 s	Für den Prozess-Strang <i>UV LIGA</i> betrachtet

Ein typisches Additiv-System besteht aus *Inhibitor* und *Katalysator*, die miteinander konkurrieren [133, 677, 679]. Für das oben aufgeführte Beispiel in Abbildung 2.7 b) bedarf es noch eines *Einebners*, der die Wirkung des Katalysators nach Auffüllen des vertikalen Kanals stoppt, um ein Überwachsen in der Mitte zu verhindern.

Für die Vorgänge im Kupferelektrolyten seien folgende Grund-Konzentrationen im Elektrolytvolumen vor der Arbeitselektrode vorausgesetzt:



Die Reduktion von Kupfer an der Arbeitselektrode findet in zwei Stufen statt:



Im Additiv-freien Elektrolyten bestimmt der Vorgang nach Gleichung (C.8) die Reaktionsgeschwindigkeit. Die Zugabe von Chlorid beschleunigt diese

Reaktion, sodass für flächige Substrate Grenzstromdichten im Bereich von $10 - 15 \text{ mA/cm}^2$ möglich werden. Da Chlorid während der Abscheidung abgebaut wird, kann die Grenzstromdichte über die Zeit absinken. Wird die Stromdichte nicht nachgeführt, entsteht eine Keimbildungshemmung und es wachsen größere Kristalle [301].

Der *Inhibitor* – auch Suppressor genannt – entsteht durch Zugabe von sauerstoffhaltigen, hochmolekularen Verbindungen, zum Beispiel Poly-Ethylen-Glycol (PEG) in einen Chlorid-haltigen Elektrolyten [677, 679]. Auf der galvanischen Startschicht eines Wafers bildet sich sehr schnell z. B. eine PEG-Chlorid-Schicht aus. Sie blockiert den Zugang von Cu^{2+} zur Arbeitselektrode und damit den geschwindigkeitsbestimmenden Vorgang nach Gleichung (C.8). PEG-Cl selbst wird jedoch quasi nicht in die Kupferschicht mit eingebaut [679]. So lässt sich die Abscheiderate um den Faktor 10-20 inhibieren [133].

Der *Katalysator* – auch Accelerator genannt – hebt den passivierenden Effekt des Inhibitors auf. Dazu kommen Schwefelverbindungen zum Einsatz, z. B. Dinatriumsalz Bis-(ω -Sulfo-Propyl)-diSulfid (SPS). SPS wirkt auf zwei Arten. Einerseits setzt es sich an Stelle von Chlorid auf die Kupfer-Oberfläche und ersetzt somit einige Co-Inhibitoren. Andererseits behindern die geladenen Endgruppen die Bildung neuer PEG-Cl-Inhibitor-Schichten. Inhibitor und Katalysator konkurrieren also um die Oberflächenbelegung, jedoch ist der Diffusionskoeffizient des langkettigen Inhibitors wesentlich geringer als der des kurzketten Katalysators, sodass in Abbildung C.3 a) der Boden der Struktur stark mit Katalysator-Molekülen und die Oberfläche stark mit Inhibitor-Molekülen belegt ist. Dieser Effekt lässt sich durch eine Vorbehandlung mit Katalysator noch verstärken.

Somit bleibt der Katalysator während der Abscheidung auf der Oberfläche und wandert mit der abgeschiedenen Schichtdicke mit. Verringert sich nun mit der Zeit der Abscheidung – wie in Abbildung C.3 a) bis d) dargestellt – die effektive Oberfläche, steigt die Katalysator-Konzentration am oberen Ende des metallischen Stäbchens. Anschließend kann es dort zur Überwachung kommen, vgl. Abbildung C.3 e). Dabei ist zu beachten, dass die Zersetzung des Katalysators langsamer vonstattengeht, wenn eine verhältnismäßig hohe Stromdichte gewählt wird [679].

Der *Einebner* – auch Leveler genannt – wird erst zum Ende der Abscheidung dem Elektrolyten beigegeben und ersetzt die Inhibitor- und Katalysator-Adsorbate. Nach den Vorgängen in Abbildung C.3 a) bis d) sorgen die funk-

tionellen Stickstoffgruppen des Einebners so für eine planare Oberfläche wie in Abbildung C.3 f) und g) dargestellt. Bei der Fertigung von Through Silicon Vias ist dieser Effekt zur Kostensenkung bei der anschließenden Planarisierung von Bedeutung.

Industriell kommt dieser Fertigungsprozess für die Abscheidung von Durchkontaktierungen durch Siliziumsubstrate zum Einsatz. Werden die Kupferstrukturen vor der Fertigung der elektronischen Schaltkreise abgeschieden, spricht man von *Via First*; erfolgt die Abscheidung erst anschließend, spricht man von *Via Last*, vgl. Tabelle C.3. Abbildung C.4 stellt den Fertigungsprozess für *Via Last* Strukturen dar: In rückseitig tieftrockengeätzte vertikale Kanäle wird nach Isolation zum Substrat und Vorbehandlung der Oberflächen Kupfer superkonform abgeschieden.

Für die kommerzielle Nutzbarkeit des Prozesses ist die geringe Fertigungsdauer kombiniert mit einer geringen Defektdichte entscheidend. Durch die allseitige Startschicht in der Galvanoform liegen anfangs sehr große Flächen vor, sodass sehr schnell abgeschieden werden kann. Kurz vor Ende der Abscheidung liegen geringe Aspektverhältnisse vor und die Geometrie ähnelt der von Kupferpfosten für WLP (Wafer Level Packaging), wo Stromdichten von bis zu 150 mA/cm^2 zum Einsatz kommen [680]. Beispielsweise werden abhängig von den Abmessungen 20-300 min für die Abscheidung eines kompletten TSV-Wafer angesetzt [133].

Seit einigen Jahren funktioniert die Abscheidung von TSV mit hohen Aspektverhältnissen zuverlässig, zum Beispiel mit $115 \mu\text{m}$ Höhe, $7 \mu\text{m}$ Durchmesser und einem Abstand von $15 \mu\text{m}$, entsprechend einem Aspektverhältnis von 16,5:1 [362]. Für die Prozessführung ist allerdings unter anderem eine sehr gezielte Einstellung und Überwachung der Chemie mit hohem Aufwand in der Analysetechnik nötig. Die Modellierung der Vorgänge erlaubt mittlerweile sehr zielgenau die Berechnung der Reaktions- und Diffusionsvorgänge in den Strukturen [681], somit lassen sich die chemischen und elektrischen Prozessparameter zur wirtschaftlichen Fertigung vorab an die Geometrie der Galvanoform anpassen [679].

Zusätzlich beeinflussen die Additive auch die Kristallisationsvorgänge. Sie hemmen die Mobilität der ad-Atome [679] und sorgen so für polykristalline und spannungsarme Schichten. Darüber hinaus ist das Material duktil ($\hat{=}$ Bruchdehnung $> 5\%$ [150] (Abschn. 12.3.3), [388] (Abschn. 2.3.3), also plastisch verformbar ohne zu Rissen zu neigen.

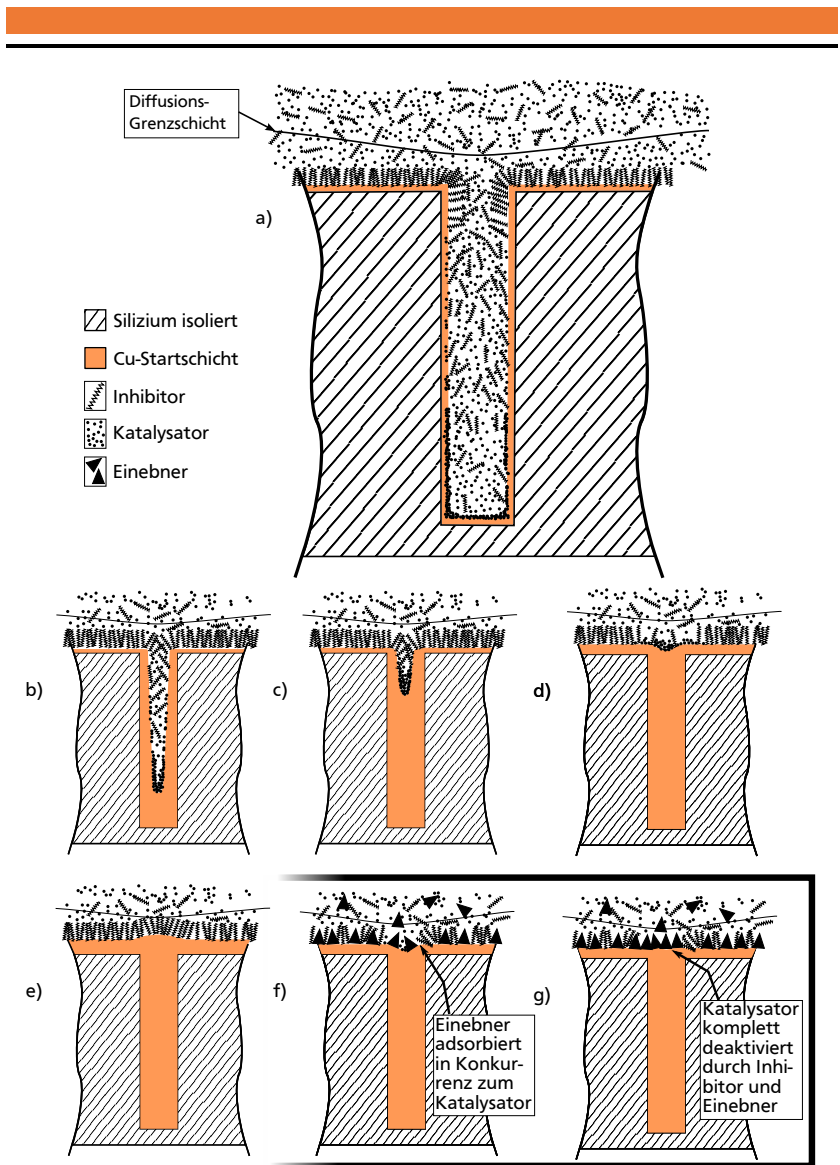


Abbildung C.3: Superkonforme Metallabscheidung in allseitig kontaktierten zurückgesetzten Mikroelektroden nach dem CEAC-Modell (Curvature Enhanced Accelerator Coverage) [133]; a)-e): Einsatz von Inhibitor und Katalysator; a)-d) und f)-g): Einsatz von Inhibitor, Katalysator und anschließend Einebner.

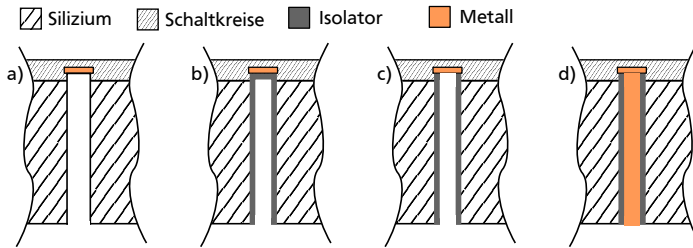


Abbildung C.4: Herstellungsprozess für Wafer-Durchkontaktierungen – Through Silicon Via – mit rückseitiger Prozessierung – Via Last –: a) Rückseitig ca. 100 µm Tief trockenätzen in das Silizium-Substrat, b) Isolation aufbringen, c) Selektiv Isolation entfernen zum Kontaktieren der Schaltkreise, d) Superkonform galvanisch füllen und evtl. planarisieren, vgl. [362].

C.2.4 Partikelfreie Elektrolytversorgung

Anodensäcke aus synthetischem Textil sind gut geeignet, um den Austritt von Anodenschlamm in den Elektrolyten zu reduzieren und gleichzeitig Elektrolytfluss hindurch zuzulassen. Weiter reduzieren lässt sich die Partikelbelastung durch eine kontinuierliche Partikelfilterung. Trotzdem sammeln sich tendenziell Partikel an der Arbeitselektrode an, wenn sie den untersten Punkt in der Elektrolysezelle darstellt. Daher vermeidet man diese Anordnung in der industriellen Fertigung, obwohl sie für den Forschungsbetrieb Vorteile mitbringt, vgl. Abschnitt C.2.1.

Kationenmembranen – beispielsweise der Marke NAFION – stellen eine Alternative dar, um den Austritt von Anodenschlamm in den Elektrolyten vollständig zu unterbinden wie in Abbildung 2.11 rechts dargestellt. Bei der Verwendung mit saurem Kupferelektrolyten ist allerdings zu beachten, dass

- der pH-Wert des Anolyten größer als 1,5 ist, besser größer als 2 [668]. Ansonsten durchdringen nur Oxoniumionen H_3O^+ die Membran anstelle der positiv geladenen Metallionen.
- immer ein gewisser Anteil Oxoniumionen die Membran passieren, ausgedrückt in einer Effektivität des Cu^{2+} -Transports im Bereich 90-98% [668].

- mit dem Transport der Kationen eine gewisse Menge Wasser vom Anolyten in den Katholyten übertragen wird.

C.2.5 Gleichmäßige Belegungsdichte

Die Abscheiderate in einem Bereich der Galvanoform ist immer abhängig vom benachbarten Bereich der Galvanoform. Ist in einem Sektor des Substrats die Belegungsdichte höher als in einem anderen, so sind zwei Effekte zu beobachten [669] [670]:

1. Im Bereich niedriger Belegungsdichte ist die Abscheiderate höher als im Bereich hoher Belegungsdichte.
2. Im Bereich niedriger Belegungsdichte ergibt sich tendenziell eine Mittenüberhöhung im Tastschnitt, wohingegen im Bereich hoher Belegungsdichte eine Randüberhöhung auftritt.

Ist es nicht möglich, durch optimierte Anordnung der Strukturen eine gleichmäßige Belegungsdichte zu erreichen, können auch Ausgleichsstrukturen helfen [682].

C.2.6 Charakterisierung der Abscheidebedingungen im Fall *Röntgen LIGA*

In Abbildung C.5 sind der steigende Ast (a) und der fallende Ast (b) der Stromdichte-Potentialkurven in logarithmischer Tafel-Auftragung dargestellt. Die Arbeitselektrode weist wie im Layout des Falls *Röntgen LIGA* eine galvanische Startschicht mit $A \approx 1 \text{ cm}^2$ aus galvanisch abgeschiedenem Kupfer auf. Allerdings ist sie zur Verringerung des experimentellen Aufwands nicht wie im Fall *Röntgen LIGA* in viele Segmente aufgeteilt auf der Waferoberfläche verteilt, sondern besteht aus einem zusammenhängenden Rechteck. Außerdem handelt es sich nicht um zurückgesetzte Mikroelektroden, sondern um eine unmittelbar mit dem Elektrolyten in Kontakt stehende Elektrode. Es kommt die Elektrolysezelle nach Abbildung 5.17 zum Einsatz. Der Elektrolyt ist nach Tabelle 5.3 zusammengesetzt, jedoch mit einer Leveler-Konzentration von 8 ml/l anstelle von 5 ml/l und einer bisherigen Nutzung von 140 A s/l = 2,3 A min/l. Wie im Hauptteil kommen hier die folgenden Definitionen mit $i(t)$ im Verbraucherzählpeilsystem (technische Stromrichtung) zur Anwendung:

$$u_{\text{ref}} = \varphi_{\text{ref}} - \varphi_{\text{A}} = \text{Referenzspannung} \quad (\text{C.10})$$

mit

φ_{ref} = Potential der Referenzelektrode

φ_{A} = Potential der Arbeitselektrode

$u_{\text{ref}}(i = 0)$ = Referenzspannung bei $i = 0$

$u_{\text{ref}} > u_{\text{ref}}(i = 0) \rightarrow \text{Abscheiden}$

$u_{\text{ref}} < u_{\text{ref}}(i = 0) \rightarrow \text{Abtragen}$

$$\eta = -u_{\text{ref}} + u_{\text{ref}}(i = 0) = \text{Überspannung} \quad (\text{C.11})$$

mit

$\eta < 0 \rightarrow \text{Abscheiden}$

$\eta > 0 \rightarrow \text{Abtragen}$

Im 1. Quadranten ($\eta > 0$) ist das Abtragen von der Arbeitselektrode (Wafer = Anode) beschrieben und im 2. Quadranten ($\eta < 0$) das Abscheiden auf der Arbeitselektrode (Wafer = Kathode). Als Referenzelektrode dient eine gesättigte Ag/AgCl-Elektrode mit einem Elektrodenpotential bei 20°C von $\varphi_{\text{ref}} = 198 \text{ mV}$ gegenüber der Standard-Wasserstoff-Elektrode (SHE). Die Arbeitselektrode besteht bis auf sehr geringe Aluminiumflächen aus Kupfer besteht (Literaturwert Kupfer gegenüber SHE: $\varphi_{\text{A}} = 337 \text{ mV}$). Die Gegenelektrode besteht aus Titan und steht in direktem Kontakt mit Kupfer-Clippings. Bei $i = 0$ stellt sich eine Referenzspannung von $u_{\text{ref}}(i = 0) \approx -100 \text{ mV}$ bis -95 mV ein.

Das Experiment zur Ermittlung der Kurven in Abbildung C.5 besteht aus den folgenden Schritten, die bei 20°C Elektrolyttemperatur mit weniger als 1 min Wartezeit zwischen den Schritten und zwischenzeitlich lediglich einer Anpassung der elektrischen Versorgung durchgeführt werden:

Vorbereitung: Abscheidung einer 40 μm dicken Cu-Schicht auf eine Cu-Dünnschicht: $\bar{u}_{\text{ref}} = 30 \text{ mV}$, $\bar{j} = 0,5..10 \text{ mA/cm}^2$ für $Q = 30 \text{ As} = 0,5 \text{ A min}$ entsprechend ca. 10 μm Schichtdicke, anschließend $\bar{u}_{\text{ref}} = 131 \text{ mV}$, $\bar{j} = 33 \text{ mA/cm}^2$ für $Q = 90 \text{ As} = 1,5 \text{ A min}$ entsprechend ca. 30 μm Schichtdicke.

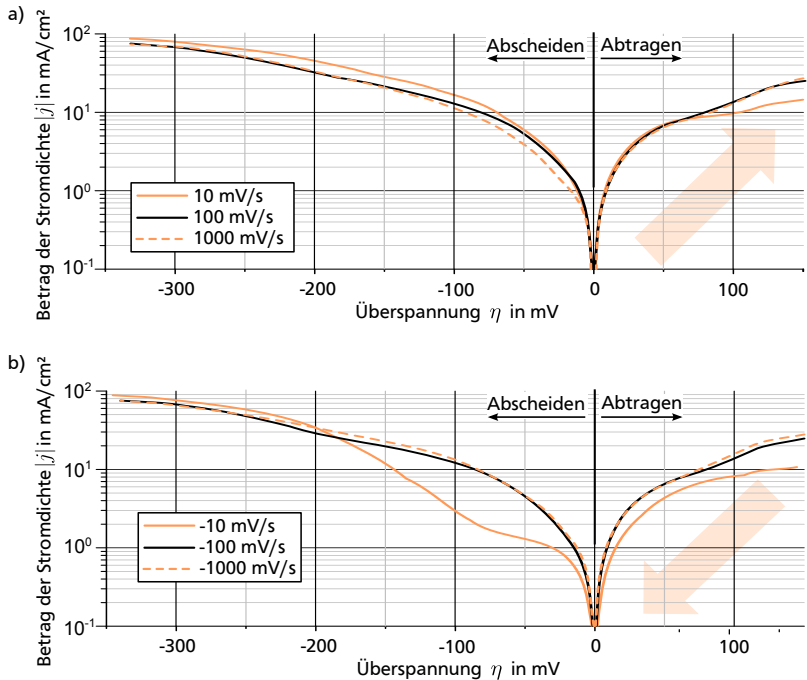


Abbildung C.5: Stromdichte-Potentialkurven mit unterschiedlichen Anstiegs- und Abfallgeschwindigkeiten der Überspannung η von 10 mV/s (gemittelt über 17 Durchläufe), 100 mV/s (gemittelt über 10 Durchläufe), 1000 mV/s (gemittelt über 10 Durchläufe) und Hilfslinien zur Bestimmung des Durchtrittsfaktors α : a) Ansteigendes η , b) Abfallendes η .

± 1000 mV/s Anstiegs- / Abfallgeschwindigkeit: 22 zyklische Durchläufe der Referenzspannung u_{ref} von -240 mV bis + 250 mV.

± 100 mV/s Anstiegs- / Abfallgeschwindigkeit: 12 zyklische Durchläufe der Referenzspannung u_{ref} von -240 mV bis + 250 mV.

± 10 mV/s Anstiegs- / Abfallgeschwindigkeit: 18 zyklische Durchläufe der Referenzspannung u_{ref} von -240 mV bis + 250 mV.

Nachbereitung: Abscheidung von Kupfer, um evtl. bei zyklischen Durchläufen entstandene Kupfer-Partikel aus dem Katholyten zu entfernen:

$\bar{u}_{\text{ref}} = 131 \text{ mV}$, $\bar{j} = 3..40 \text{ mA/cm}^2$ für $Q = 60 \text{ As} = 1 \text{ A min}$ entsprechend $20 \mu\text{m}$ Schichtdicke.

Die maximal anwendbare Grenzstromdichte der Kupferabscheidung lässt sich durch Ablesen der Stromdichte bei $\eta \approx -337 \text{ mV}$ bestimmen. Sie liegt bei $j_{\text{lim}} \approx 80 \text{ mA/cm}^2$. Der Einsatz des Redoxmediators $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ sowie der Additive kann diese Stromdichte bei sinkender Abscheide-Ausbeute steigern. Dies wird hier nicht weiter betrachtet, da die Stromdichten nahe der Grenzstromdichte für die hier betrachtete Fertigung im Labormaßstab nicht relevant ist.

Aus den Messwerten lassen sich mit Hilfe der vereinfachten Formen der Butler-Volmer-Gleichung Aussagen über die Austauschstromdichte j_0 und den Durchtrittsfaktor α gewinnen. Die Austauschstromdichte j_0 ist eine zusammenfassende charakteristische Größe für die beteiligten Spezies und die elektrokatalytische Aktivität der Elektrode. Sie fließt in die Berechnung der Durchtrittsüberspannung η_D ein, vgl. zweite Zeile in Tabelle C.2, und trägt so zur Quantifizierung der Durchtrittshemmung bei. Der Durchtrittsfaktor α – gleichbedeutend mit dem Symmetriekoeffizienten der Butler-Volmer-Gleichung – fließt ebenfalls in die Berechnung der Durchtrittsüberspannung η_D ein. Liegt der Wert von α bei 0,5, liegt symmetrisches Verhalten von Abscheidung und Abtragen vor. Ist α kleiner als 0,5, läuft das Abscheiden beschleunigt im Vergleich zum Abtragen ab. Ist α größer als 0,5, läuft das Abtragen beschleunigt im Vergleich zum Abscheiden ab.

Betrachtet man den Bereich $|\eta| < 10 \text{ mV}$, so lässt sich aus der Steigung der linear aufgetragenen Stromdichte-Potentialkurve die Austauschstromdichte j_0 bestimmen, vgl. Tabelle C.1. Die im Experiment untersuchten Fälle zeigen alle ähnliches Verhalten bis auf den Fall der Abfallgeschwindigkeit $\dot{\eta} = -10 \text{ mV/s}$, gleichbedeutend mit der Anstiegsgeschwindigkeit $\dot{u}_{\text{ref}} = 10 \text{ mV/s}$. Im Folgenden sei daher die Fallunterscheidung nach $\dot{\eta} \neq -10 \text{ mV/s}$ und $\dot{\eta} = -10 \text{ mV/s}$ getroffen. Für $\dot{\eta} \neq -10 \text{ mV/s}$ ergibt sich eine Austauschstromdichte $j_0 = 1,243^{+0,076}_{-0,101} \text{ mA/cm}^2$, für $\dot{\eta} = -10 \text{ mV/s}$ ergibt sich $j_0 = 0,689^{+0,172}_{-0,108} \text{ mA/cm}^2$. Im Vergleich scheint für $\dot{\eta} = -10 \text{ mV/s}$ eine geringere Aktivität der Elektrode vorzuliegen als für $\dot{\eta} \neq -10 \text{ mV/s}$. Insgesamt liegen die Austauschstromdichten im Bereich üblicher Werte für Kupfer [679, 683]. Die gemessenen Werte sind mit wesentlichen Unsicherheiten behaftet, unter anderem da die Elektrodenfläche rein planar geometrisch berechnet wurde ohne Beachtung der Oberflächenrauheit.

Betrachtet man den Bereich $|\eta| \gg 25,2 \text{ mV}$, lässt sich zusätzlich der Durchtrittsfaktor α aus den folgenden Zusammenhängen bestimmen, vgl. Tabelle C.1, wobei die Stromdichte für die technische Stromrichtung von $i(t)$ im Verbraucherzählpfeilsystem vorausgesetzt sei:

$$j_D = j_0 \begin{cases} -e^{\alpha \frac{zF}{R_0 T} \eta} & \eta \gg 25,2 \text{ mV (Abtragen)} \\ e^{-(1-\alpha) \frac{zF}{R_0 T} \eta} & \eta \ll -25,2 \text{ mV (Abscheiden)} \end{cases} \quad (\text{C.12})$$

$$\Rightarrow \alpha = \begin{cases} \frac{R_0 T}{zF|\eta|} \ln \left| \frac{j_D}{j_0} \right| & \eta \gg 25,2 \text{ mV (Abtragen)} \\ 1 - \frac{R_0 T}{zF|\eta|} \ln \left| \frac{j_D}{j_0} \right| & \eta \ll -25,2 \text{ mV (Abscheiden)} \end{cases} \quad (\text{C.13})$$

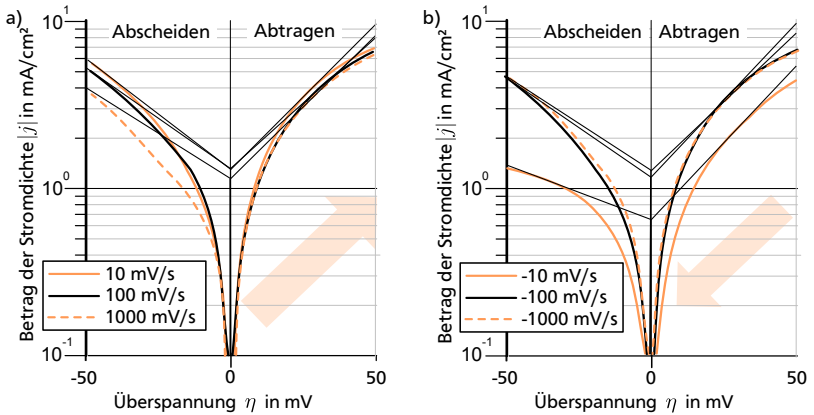


Abbildung C.6: Vergrößerter Ausschnitt aus den Stromdichte-Potentialkurven in Abbildung C.5: a) Ansteigendes η , b) Abfallendes η .

Ausgehend von den Austauschstromdichten j_0 lassen sich in Abbildung C.6 Achsenabschnitte wählen, von denen aus Tangenten an die Verläufe der Kurven angetragen werden. Die Steigungen der Tangenten geben Auskunft über den Durchtrittsfaktor α . Er liegt für $\dot{\eta} \neq -10 \text{ mV/s}$ bei $\alpha = 0,575^{+0,109}_{-0,120}$ und für $\dot{\eta} = -10 \text{ mV/s}$ bei $\alpha = 0,673^{0,138}_{-0,143}$. Das Abtragen läuft also leicht beschleunigt gegenüber dem Abscheiden ab, während für $\dot{\eta} = -10 \text{ mV/s}$ diese Tendenz deutlicher ausfällt. Bei der Interpretation dieser Werte ist zu beachten, dass die Gegenelektrode ca. zwei

Größenordnungen größer ist als die Arbeitselektrode. Zudem ist zu beachten, dass sich durch die Summation der einzelnen Messunsicherheiten sowie das graphische Verfahren große Messunsicherheiten der Ergebnisse ergeben können.

Die abfallende Kurve in Abbildung C.5 b) mit $\eta \neq -10 \text{ mV/s}$ zeigt im Bereich niedriger Abscheidestromdichten eine Verformung im Vergleich mit den Kurven größerer Anstiegsgeschwindigkeiten. Möglich sind zwei Gründe sowie deren Kombination:

Verarmungspolarisation: Durch die geringe Abfallgeschwindigkeit der Überspannung η verarmt der Elektrolyt beim Abscheiden im Bereich $\eta \approx -30 \text{ mV} \dots -70 \text{ mV}$ in der Nähe der Arbeitselektrode. Da keine Konvektion vorherrscht, stellt sich eine asymptotische Annäherung an die Grenzstromdichte durch Diffusion ein. Sinkt η weiter ab, treten Wirbel der gravitationsgestützten Abscheidung auf [301] und die Grenzstromdichte erhöht sich durch konvektiven Stofftransport mit sinkendem η .

Additivwirkung: Nach dem Abtragen bei $\eta > 0$ befinden sich durch das Auflösen der Kupferoberfläche kaum Additive auf der Arbeitselektrode. Sinkt η nun unter 0 mV und beginnt die Abscheidung auf der Arbeitselektrode, besetzen vor allem Inhibitoren (z. B. Polyethylenglykol (PEG) bzw. funktionale Stickstoffgruppen) die Oberfläche. Katalysatoren (z. B. Dinatriumsalz SPS) sind bei geringen Potentialen und Stromdichten im Vergleich zu den anderen verwendeten Additiven weniger aktiv [679]. Mit sinkender Überspannung und steigender Stromdichte steigt auch die Aktivität der Katalysatoren. Sie ersetzen die Inhibitoren und führen so im Maximum des Potentials zu höheren Stromdichten als bei den schnellen Durchläufen. Steigt nun die Überspannung in Abbildung C.5 a) im Bereich Abscheiden wieder ab, sind anfangs die Katalysatoren noch aktiv, mit steigender Überspannung sinkt jedoch deren Aktivität und die Kurve mit der Anstiegsgeschwindigkeit 10 mV/s nähert sich den Kurven mit 100 mV/s und 1000 mV/s an. Die Erklärung dieser Kurvenform wird dadurch gestützt, dass in Vorversuchen mit geringeren Inhibitor-Konzentrationen und gleichen Konzentrationen der anderen Additive die Verformung deutlich geringer ausgefallen ist. Ebenso fällt die Verformung bei den höheren Anstiegsgeschwindigkeiten deutlich geringer aus, was sich mit dem extensiven Abtragen durch die kürzere Abtragszeit begründen lässt.

D Fertigungstechnologie

Ergänzend zu den in Kapitel 5 dargestellten Schritten zur Fertigung des Technologie-Demonstrators mit Hilfe von LIGA-Verfahren, seien hier einige weiterführende Details aufgeführt – durchaus auch mit Hinweisen, was nicht funktioniert.

D.1 Technologische Gründe für die Gestalt der Mikrostruktur

Im Folgenden ist aufgelistet, welche technologischen Gründe dagegen sprechen, den Luftspalt zwischen Masseblock und Gegenelektroden auf Höhe des oberen Stabendes anzusiedeln:

- Mehrfaches Galvanisieren mit großer Abscheidedauer ist sehr fehleranfällig.
 - Abscheidezeiten deutlich größer als eine Stunde – wie sie für mehrere hundert Mikrometer hohe Strukturen nötig sind – können zur Beschädigung metallischer Dünnschichten führen, da ätzende Eigenschaften des Elektrolyten die Dünnschichten angreifen. Ist die Kontaktschicht beschädigt, lässt sich eine zweite galvanische Abscheidung nicht definiert starten.
 - Weiterhin kann eine große Kontaktdauer zwischen der Dichtlippe der Waferaufnahme und Dünnschichten zum Anhaften führen, sodass die Dünnschichten beim Öffnen der Waferaufnahme abgelöst werden können. Auch diese Beschädigung der Kontaktschicht verhindert eine definierte zweite galvanische Abscheidung.
- Lithographische Prozessschritte nach dem Planarisieren sind zu vermeiden.
 - Das Planarisieren der galvanisch abgeschiedenen Schichten bringt durch die Schleifpartikel Verunreinigungen auf den Wafer, die sich nicht vollständig entfernen lassen. Diese sind aus dem Lithographiebereich fern zu halten. Außerdem können Sie

die Sicht auf die Justagestrukturen der Kontaktschicht so stark verschlechtern, dass bei der Lithographie der *oberen Galvanoform* die Justage unmöglich wird.

- Außerdem stellt das Verfahren eine große mechanische Belastung der Strukturen dar. Es hat sich gezeigt, dass sich durch Fertigungsfehler auf einem 100 mm-Wafer mit mehreren Hundert Strukturen leicht einige Strukturen ablösen. Diese abgelösten Strukturen beschädigen weitere Strukturen. Zudem hinterlässt der undefinierte Prozess des Ablösens Reste auf der Waferoberfläche, die die folgenden Prozessschritte negativ beeinflussen können.
- Separate Ansteuerung der galvanischen Startschichten für den Stab und für die Masseblöcke hat sich experimentell nicht umsetzen lassen.
 - Der laterale Abstand zwischen der Zuleitung zur Kontaktierung der Zentralelektrode und den Gegenelektroden ist klein zu wählen, um einen möglichst kleinen Inertialsensor aufzubauen, und er ist groß zu wählen, um ein geringes Kurzschlussrisiko zwischen den Elektroden innerhalb der Kontaktschicht zu erreichen. Verbunden mit günstiger Maskentechnik hat sich für die Arbeiten im Mikrotechniklabor des Instituts EMK ein minimaler Abstand von 30 μm als ein sinnvoller Kompromiss herausgestellt. Allerdings hat sich im Experiment gezeigt, dass bei der sehr langen Grenzlinie zwischen mehreren Hundert parallel geschalteten Strukturen auf einem gesamten 100 mm-Wafer häufig ein Kurzschluss auftritt. Dies kann an der Defektdichte im Lithographieprozess liegen, aber auch am parasitären Widerstand von optisch kaum sichtbaren metallischen Dünnschichten, die nach dem strukturierten Ätzprozess der Leiterbahnen auf dem Substrat verbleiben können.

D.2 Strukturieren gesputterter Cr-Cu-Schichten

Ätzverfahren sind zusammenfassend beschrieben in [684–687].

D.2.1 Lift-off

Neben dem in Abschnitt 5.2 dargestellten Lift-off-Verfahren wurde alternativ zum aus gesundheitlichen Gründen zu ersetzenden Lösungsmittel N-Methyl-2-pyrrolidon (NMP) der Remover Technistrip NI 555 (Dipropylenglykolmethylether Isomerengemisch, TECHNIC FRANCE) getestet. Dieser Remover ist nur für kleine zu entfernende und zusammenhängende Flächen geeignet, da er wesentlich weniger stark durch Metallschichten hindurch diffundiert als NMP (Aussage Dr. Christian Koch von microchemicals).

D.2.2 Ätzen

Kupfer lässt sich bei Raumtemperatur sehr gut ätzen mit Eisen(III)-Chlorid (FeCl_3 , nicht selektiv zu Nickel, im Mikrotechniklabor des Instituts EMK nicht zugelassen), Ammoniumperoxodisulfat mit kleinen Mengen Wasserstoffperoxid-Zusatz (APDS: 263 g/l Ammoniumpersulfat, 221 ml/l 25%-iges Ammoniak, 779 ml/l Wasser, ätzt selektiv zu Nickel) oder Natriumpersulfat (150 g/l $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, langsamer als APDS, schonender gegenüber Photolack).

Chrom lässt sich sehr gut und mit geringem Angriff des Photolacks ätzen mit einem Gemisch aus Cerammoniumnitrat, Perchlorsäure und Wasser (10,9% : 4,25% : 84,85%, Chrome ETCH N°1, Sotrachem Technic France S.A.), allerdings nicht wenn Kupfer in direktem Kontakt mit Chrom steht. Dann bilden sich Höfe rund um die Bereiche, wo noch Kupfer unter dem Photolack ist. Unter Anwendung von konzentrierter Salzsäure als Ätzmittel lassen sich die Höfe wesentlich reduzieren, allerdings verbleibt eine sehr dünne, kaum sichtbare Chromschicht und der Photolack wird erheblich angegriffen.

Nach der Entscheidung innerhalb dieser Arbeit den Lift-off-Prozess zu nutzen, ist folgendes Rezept bekannt geworden, mit dem Chrom in Anwesenheit von Kupfer geätzt werden kann [688]: 20 g Kaliumhexacyanoferrat(III), 20 g Natriumhydroxid, 100 ml Wasser.

D.3 Sehr dicke Photoresist-Schichten

Für viele mikrotechnische Bauteile sind dicke bis sehr dicke Photoresist-Schichten notwendig. Hier können übliche Novolac-basierte Produkte nicht

mehr ohne weiteres Anwendung finden und es sind neben chemischer Verstärkung der Novolac-basierten Produkte auch alternative chemische Grundstoffe zu betrachten. Die folgende Auflistung der einsetzbaren Photoresiste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit:

AZ 9260 Dieser Positivresist ist Novolac-basiert, zeigt dadurch eine geringere Transparenz im UV-Bereich auf und lässt sich nur bis Dicken von maximal 150 µm mikrostrukturieren [689].

AR-N 4400 Dieser Negativresist ist Novolac-basiert und ist nach Experimenten im Mikrotechniklabor des Instituts EMK im Gegensatz zu den Herstellerangaben nur für Schichtdicken kleiner 80 µm geeignet [52].

SU-8 Diese Negativresist-Familie ist Epoxy-basiert, zeigt dadurch eine sehr hohe Transparenz im UV-Bereich und lässt sich bis zu extremen Schichtdicken von über 1 mm mikrostrukturieren [690]. SU-8 benötigt jedoch einen Tempersschritt nach der Belichtung (Post Exposure Bake, PEB) und bildet dadurch leicht mechanische Spannungen aus [691, 692]. Auch die Trockenlaminat-Varianten des Photoresists zeigen dieses Verhalten: DJ DevCorp SUEX [693–695], Dupont PerMX [696, 697].

KMPR Dieser Negativresist vermeidet viele der oben genannten Nachteile, ist jedoch bei -10°C zu lagern, dadurch in der Handhabung deutlich aufwendiger und im Mikrotechniklabor des Instituts EMK nicht etabliert [698–700].

AZ 125 nXT Dieser Negativresist hat eine Acryl-Polymer-Basis und ist im Mikrotechniklabor des Instituts EMK für Schichtdicken zwischen 100 µm und 1,4 µm etabliert [21, 649].

Intervia BPN Dieser Negativresist hat vergleichbare Eigenschaften, ist jedoch im Mikrotechniklabor des Instituts EMK nicht etabliert [701–706].

JSR THB-151N Auch dieser Negativresist zeigt vergleichbare Eigenschaften, ist jedoch im Mikrotechniklabor des Instituts EMK nicht etabliert [707, 708].

DiaPlate 133 Auch dieser Negativresist weist ähnliche Eigenschaften auf, ist jedoch im Mikrotechniklabor des Instituts EMK nicht etabliert [709].

D.3.1 Messverfahren für die spezifische und spektrale Absorption sehr dicker Photoresist-Schichten

Zur Messung wird der Messkopf des Spektrometers auf einem Wafer fixiert und in definierter Position auf die Waferaufnahme des Maskenjustierbelichters gelegt. Der Photoresist wird auf einen Glaswafer aufgetragen, der mit Photoresist beschichtete Glaswafer auf den Messkopf gelegt und flutbelichtet. Folgendes Substrat und folgende Messgeräte kommen zum Einsatz:

Glaswafer Floatglas Borofloat 33 mit 100 mm Durchmesser und 700 µm Dicke von Schott Technical Glas Solutions, Jena.

Spektrometer Ocean Optics USB2+H04082 mit Detektor ILX-511B, Gitter und Lichtleitfasern für den Wellenlängenbereich 200 nm bis 575 nm. Ein Pixel des Spektrometers entsprechen einer spektralen Breite von 0,38 nm.

Lichtquelle Maskenjustierbelichter SÜSS MA 56 M mit einer 350 W Hg-Dampflampe. Das Spektrum lässt sich durch den Einsatz von Filtern im Strahlengang begrenzen [661]. Zur Messung kommt der gesamte Wellenlängenbereich von der i- (365 nm) über die h- (405 nm) bis hin zur g-Linie (436 nm) des Quecksilber-Dampflampe zum Einsatz, kurz *ghi-line* in Abbildung D.1. Der Vollständigkeit halber sind in der Abbildung auch die Spektren beim Einsatz der Filter *i-line* und *gh-line* dargestellt, jeweils unter Angabe der mit dem Photometer gemessenen und gemittelten Intensität.

Photometer Photometer ILT 1400 mit Detektor XRL140A zur Messung der Intensität. Die Intensität wird mit Hilfe einer speziellen Halterung an fünf definierten Orten der Waferfläche gemessen und gemittelt. Der Mittelwert wird als konstant über die Zeit angenommen und man erhält die Belichtungsdosis durch Multiplikation der gemittelten Intensität mit der Zeit. Der Anzeigewert des Photometers wird unverändert übernommen, wobei das Datenblatt des Detektors die in Abbildung D.1 dargestellte relative spektrale Empfindlichkeit auführt.

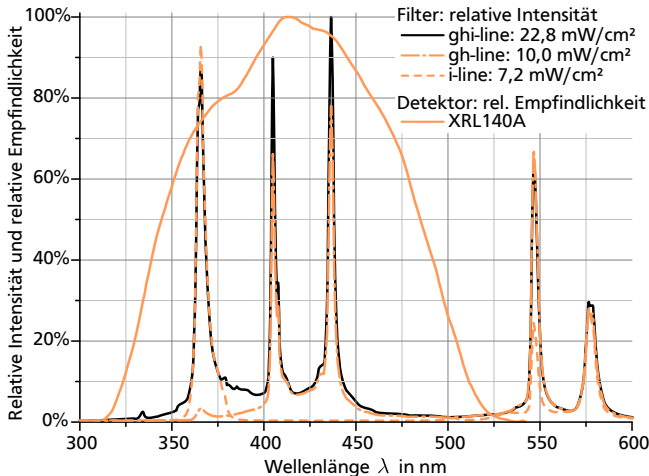


Abbildung D.1: Intensitätsspektren bei der Belichtung mit dem Maskenjustierbelichter SÜSS MA 56 M sowie Empfindlichkeit des Photometer-Detektors, Details im Text.

D.4 Aufbau- und Verbindungstechnik

Ergänzend zu den in Abschnitt 5.11 beschriebenen Fertigungsschritten zur Aufbau- und Verbindungstechnik des Technologie-Demonstrators sind hier Auszüge aus Datenblättern sowie Anschlussbelegungen aufgeführt.

D.4.1 Auszug aus Datenblatt AD 7745 und AD 7746

Die Abbildungen D.2 bis D.4 zeigen auszugsweise wesentliche Seiten des Datenblatts, in dem keine Ansicht des Silizium-Chips enthalten ist.

Nach Entfernen des Polymergehäuses im Reaktivradikalstrom mit ähnlichen Parametern wie in Tabelle 5.12 angegeben, ist der integrierte Schaltkreis ohne Gehäusung mikroskopisch untersuchbar, siehe Abbildung D.5. Der Chip hat eine Größe von 2,33 mm × 2,33 mm. Da der CF₄-Anteil im Gasstrom auch Oxidschichten angreift, ist der Schaltkreis jedoch elektronisch nicht mehr funktionsfähig. Das Öffnen des Gehäuses zeigt, dass unterhalb des



24-Bit Capacitance-to-Digital Converter with Temperature Sensor

AD7745/AD7746

FEATURES

Capacitance-to-digital converter
New standard in single chip solutions
Interfaces to single or differential floating sensors
Resolution down to 4 aF (that is, up to 21 ENOB)
Accuracy: 4 fF
Linearity: 0.01%
Common-mode (not changing) capacitance up to 17 pF
Full-scale (changing) capacitance range: ± 4 pF
Tolerant of parasitic capacitance to ground up to 60 pF
Update rate: 10 Hz to 90 Hz
Simultaneous 50 Hz and 60 Hz rejection at 16 Hz

Temperature sensor on-chip
Resolution: 0.1°C , accuracy: $\pm 2^\circ\text{C}$

Voltage input channel
Internal clock oscillator

2-wire serial interface (I²C-compatible)

Power
2.7 V to 5.25 V single-supply operation
0.7 mA current consumption
Operating temperature: -40°C to $+125^\circ\text{C}$
16-lead TSSOP package

APPLICATIONS

Automotive, industrial, and medical systems for
Pressure measurement
Position sensing
Level sensing
Flowmeters
Humidity sensing
Impurity detection

GENERAL DESCRIPTION

The AD7745/AD7746 are a high resolution, Σ -A capacitance-to-digital converter (CDC). The capacitance to be measured is connected directly to the device inputs. The architecture features inherent high resolution (24-bit no missing codes, up to 21-bit effective resolution), high linearity ($\pm 0.01\%$), and high accuracy (± 4 fF factory calibrated). The AD7745/AD7746 capacitance input range is ± 4 pF (changing), while it can accept up to 17 pF common-mode capacitance (not changing), which can be balanced by a programmable on-chip, digital-to-capacitance converter (CAPDAC).

The AD7745 has one capacitance input channel, while the AD7746 has two channels. Each channel can be configured as single-ended or differential. The AD7745/AD7746 are designed for floating capacitive sensors. For capacitive sensors with one plate connected to ground, the AD7747 is recommended.

The parts have an on-chip temperature sensor with a resolution of 0.1°C and accuracy of $\pm 2^\circ\text{C}$. The on-chip voltage reference and the on-chip clock generator eliminate the need for any external components in capacitive sensor applications. The parts have a standard voltage input, which together with the differential reference input allows easy interface to an external temperature sensor, such as an RTD, thermistor, or diode.

The AD7745/AD7746 have a 2-wire, I²C-compatible serial interface. Both parts can operate with a single power supply from 2.7 V to 5.25 V. They are specified over the automotive temperature range of -40°C to $+125^\circ\text{C}$ and are housed in a 16-lead TSSOP package.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAMS

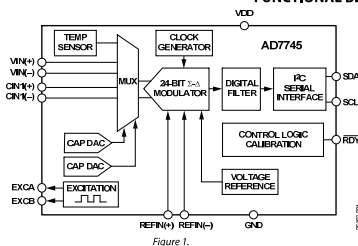


Figure 1.

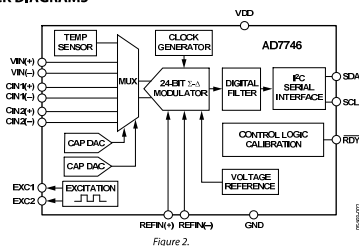


Figure 2.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 © 2005 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

Abbildung D.2: Auszug aus Datenblatt AD 7745 und AD 7746: Seite 1 von 28.

PIN CONFIGURATIONS AND FUNCTION DESCRIPTIONS

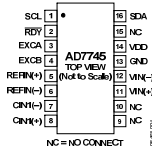


Figure 4. AD7745 Pin Configuration (16-Lead TSSOP)

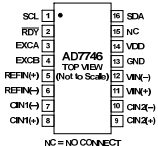


Figure 5. AD7746 Pin Configuration (16-Lead TSSOP)

Table 4. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	SCL	Serial Interface Clock Input. Connects to the master clock line. Requires pull-up resistor if not already provided in the system.
2	RDY	Logic Output. A falling edge on this output indicates that a conversion on enabled channel(s) has been finished and the new data is available. Alternatively, the status register can be read via the 2-wire serial interface and the relevant bit(s) decoded to query the finished conversion. If not used, this pin should be left as an open circuit.
3, 4	EXCA, EXCB	CDC Excitation Outputs. The measured capacitance is connected between one of the EXC pins and one of the CIN pins. If not used, these pins should be left as an open circuit.
5, 6	REFIN(+), REFIN(-)	Differential Voltage Reference Input for the Voltage Channel (ADC). Alternatively, the on-chip internal reference can be used for the voltage channel. These reference input pins are not used for conversion on capacitive channel(s) (CDC). If not used, these pins can be left as an open circuit or connected to GND.
7	CIN1(-)	CDC Negative Capacitive Input in Differential Mode. This pin is internally disconnected in single-ended CDC configuration. If not used, this pin can be left as an open circuit or connected to GND.
8	CIN1(+)	CDC Capacitive Input (in Single-Ended Mode) or Positive Capacitive Input (in Differential Mode). The measured capacitance is connected between one of the EXC pins and one of the CIN pins. If not used, this pin can be left as an open circuit or connected to GND.
9, 10 (AD7745)	NC	Not Connected. This pin should be left as an open circuit.
9 (AD7746)	CIN2(+)	CDC Second Capacitive Input (in Single-Ended Mode) or Positive Capacitive Input (in Differential Mode). If not used, this pin can be left open circuit or connected to GND.
10 (AD7746)	CIN2(-)	CDC Negative Capacitive Input in Differential Mode. This pin is internally disconnected in a single-ended CDC configuration. If not used, this pin can be left as an open circuit or connected to GND.
11, 12	VIN(+), VIN(-)	Differential Voltage Input for the Voltage Channel (ADC). These pins are also used to connect an external temperature sensing diode. If not used, these pins can be left as an open circuit or connected to GND.
13	GND	Ground Pin.
14	VDD	Power Supply Voltage. This pin should be decoupled to GND, using a low impedance capacitor, for example in combination with a 10 μ F tantalum and a 0.1 μ F multilayer ceramic.
15	NC	Not Connected. This pin should be left as an open circuit.
16	SDA	Serial Interface Bidirectional Data. Connects to the master data line. Requires a pull-up resistor if not provided elsewhere in the system.

CAPDAC

The AD7745/AD7746 CDC full-scale input range is ± 4.096 pF. For simplicity of calculation, however, the following text and diagrams use ± 4 pF. The part can accept a higher capacitance on the input and the common-mode or offset (not-changing component) capacitance can be balanced by programmable on-chip CAPDACs.

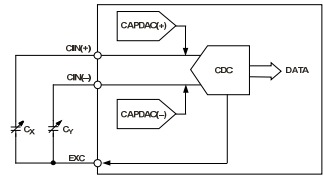


Figure 29. Using a CAPDAC

The CAPDAC can be understood as a negative capacitance connected internally to the CIN pin. There are two independent CAPDACs, one connected to the CIN(+) and the second connected to the CIN(-). The relation between the capacitance input and output data can be expressed as

$$DATA \approx (C_x - CAPDAC(+)) - (C_y - CAPDAC(-))$$

The CAPDACs have a 7-bit resolution, monotonic transfer function, are well matched to each other, and have a defined temperature coefficient. The CAPDAC full range (absolute value) is not factory calibrated and can vary up to $\pm 20\%$ with the manufacturing process. See the Specifications section and typical performance characteristics in Figure 17.

The CAPDACs are shared by the two capacitive channels on the AD7746. If the CAPDACs need to be set individually, the host controller software should reload the CAPDAC values to the AD7746 before executing conversion on a different channel.

SINGLE-ENDED CAPACITIVE INPUT

When configured for a single-ended mode (the CAPDIFF bit in the Cap Setup register is set to 0), the AD7745/AD7746 CIN(-) pin is disconnected internally. The CDC (without using the CAPDACs) can measure only positive input capacitance in the range of 0 pF to 4 pF (see Figure 30).

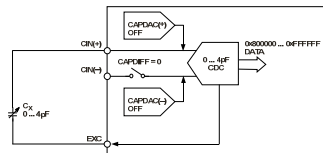


Figure 30. CDC Single-Ended Input Mode

The CAPDAC can be used for programmable shifting the input range. The example in Figure 31 shows how to use the full ± 4 pF CDC span to measure capacitance between 0 pF to 8 pF.

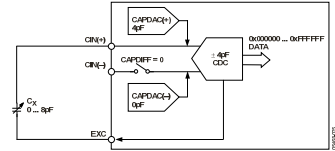


Figure 31. Using CAPDAC in Single-Ended Mode

Figure 32 shows how to shift the input range further, up to 21 pF absolute value of capacitance connected to the CIN(+).

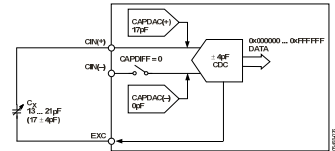


Figure 32. Using CAPDAC in Single-Ended Mode

DIFFERENTIAL CAPACITIVE INPUT

When configured for a differential mode (the CAPDIFF bit in the Cap Setup register set to 1), the AD7745/AD7746 CDC measures the difference between positive and negative capacitance input.

Each of the two input capacitances C_x and C_y between the EXC and CIN pins must be less than 4 pF (without using the CAPDACs) or must be less than 21 pF and balanced by the CAPDACs. Balancing by the CAPDACs means that both $C_x - CAPDAC(+)$ and $C_y - CAPDAC(-)$ are less than 4 pF.

If the unbalanced capacitance between the EXC and CIN pins is higher than 4 pF, the CDC introduces a gain error, an offset error, and nonlinearity error.

See the examples shown in Figure 33, Figure 34, and Figure 35.

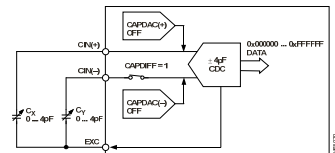


Figure 33. CDC Differential Input Mode

Schaltkreises eine durchgehende Kupferplatte zur Schirmung des Schaltkreises verwendet wird.

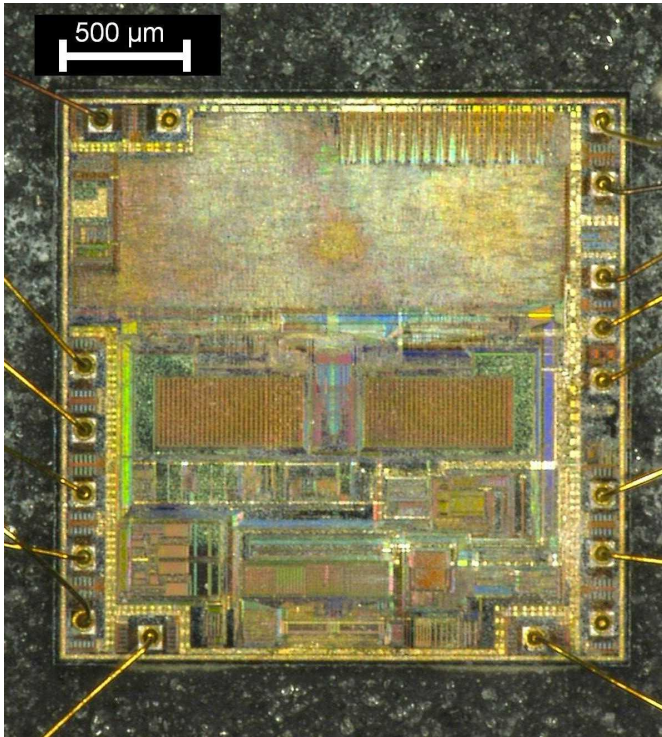


Abbildung D.5: Silizium-Chip aus dem Bauteil AD 7745 nach dem trockenchemischen Entfernen des Kunststoff-Gehäuses.

D.4.2 Datenblatt des Keramik-Leergehäuses CSB 01652



Abbildung D.6: Auszug aus Datenblatt CSB 01652: Seite 1 von 2. Angaben in inch:
1 inch = 25,4 mm.



SSM P/N CSB01652

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

13

16

12

4

PULL BACK

CLOSURE

PATTERN

PATTERN

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

71

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

87

88

89

90

91

92

93

94

95

96

97

98

99

100

D Fertigungstechnologie

D.4.3 Anschlussbelegungen der Technologie-Demonstratoren

Im Rahmen der Arbeiten konnten Funktionselemente der beiden Prozessstränge *UV LIGA* und *Röntgen LIGA* erfolgreich im Keramik-Gehäuse CSB01652 fixiert und elektrisch kontaktiert werden. Im Fall *UV LIGA* ist der vollständige Funktionsnachweis des Technologie-Demonstrators gelungen.

D.4.3.1 *UV LIGA*

Die Anschlussbelegungen für die Technologie-Demonstratoren sind in Abbildung D.8 a) für die linke Waferhälfte ($i = A$ bis H) und in Abbildung D.8 b) für die rechte Waferhälfte ($i = I$ bis O) gegeben. Dabei sind mehrere Kontaktierungsebenen in auf einmal dargestellt und die Kennzeichnungen haben folgende Bedeutungen:

- *Unterbrochene Linien*: In der Darstellung verdeckt, auf der Unterseite des IC.
- *Weiß*: In der Abbildung noch nicht realisierte elektrische Verbindung, die durch einen Leiterstreifen oder einen Kupfer-Draht zu realisieren ist und in den charakterisierten Technologie-Demonstratoren umgesetzt ist, vgl. Abbildung 5.24 c).
- *Rot*: Bezug auf die äußeren Anschlüsse des Kunststoff-Gehäuses der IC AD 7745 bzw. AD 7746.
- *Schwarz*: Bezug auf die inneren und äußeren Anschlüsse des Keramik-Gehäuses CSB 01652.
- *Kreis*: Markierung des ersten Anschlusses am Kunststoff-Gehäuse des IC AD 7745 bzw. AD 7746.
- *Rotes Oval*: Zwischen dem Substrat des Funktionselements und dem äußeren Anschluss des IC muss ein elektrischer Kontakt hergestellt werden.
- *Schwarzes Oval*: Vorzugsweise nur hier ist Massepotential am äußeren Anschluss des Keramik-Gehäuses anzulegen, um Erdschleifen zu verhindern.

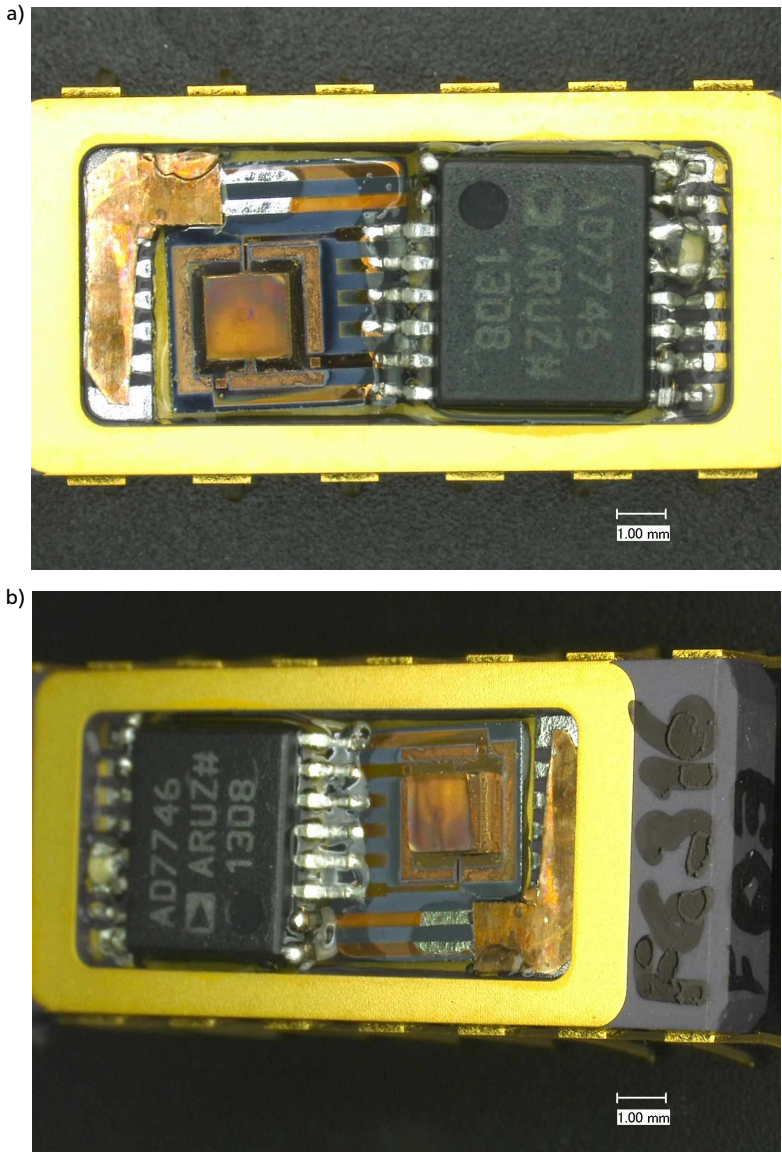


Abbildung D.9: Realisierung des Sensor-Demonstrators auf Basis des Technologie-Demonstrators FG316 F03 in zwei Ansichten.

D.4.3.2 Röntgen LIGA

Abbildung D.10 stellt das Ergebnis eines Versuchs zum Aufbau von Funktions-Demonstratoren mit einem Design der Kontaktschicht wie es im Fall *Röntgen LIGA* zum Einsatz kommt. Die Auswerteelektronik befindet sich in diesem Aufbau unterhalb des Trägersubstrats für das metallische Funktionselement.

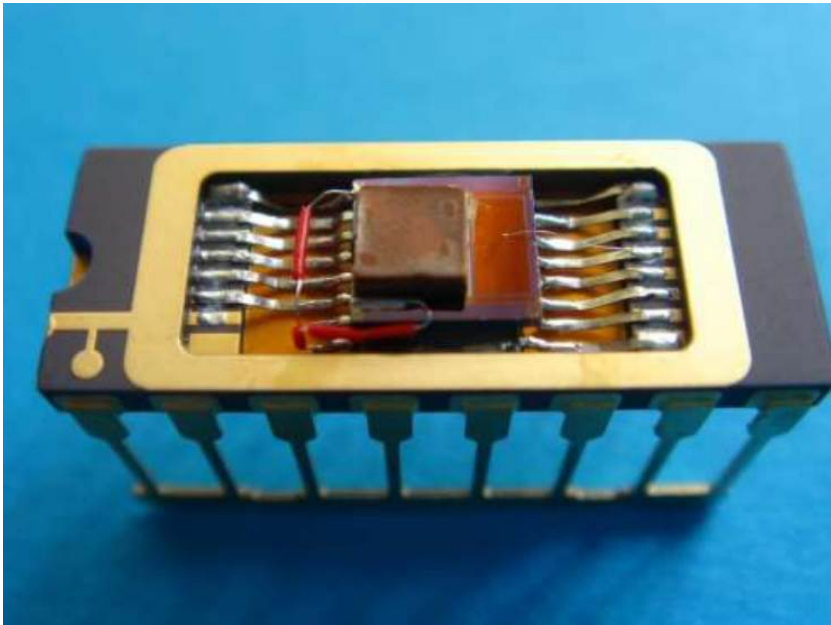


Abbildung D.10: Ergebnis aus Aufbau eines Funktions-Demonstrators mit der im Fall *Röntgen LIGA* verwendeten Elektrodengeometrie.

E Stabilität senkrechter Biegestäbe unter vertikalen Drucklasten

Wie in Abschnitt 4.1 einleitend dargestellt, zeigen senkrechte Biegestäbe unter vertikalen Drucklasten ein seitliches Ausweichverhalten. Welche Form des Ausweichverhaltens auftritt, hängt entscheidend von der Einspannung der Biegestäbe an beiden Enden ab. Außerdem stark beeinflusst ist ihr Verhalten von in Realität auftretenden Geometrieabweichungen.

E.1 Knickung des Euler-Stabs

Der Euler-Stab ist ein ideal senkrecht stehender, biegeelastischer Stab, für den die Auslenkung von der Ursprungslage in Abhängigkeit seiner Längenkoordinate z ausgedrückt sei durch $w(z)$. Zunächst ist zu klären, welche Form der Stab bei Knickung einnimmt und ab welcher Kraft F_{krit} dies eintritt. Der übersichtlichen Darstellung halber sei $w(z)$ nur in x -Richtung betrachtet, wobei jede Richtung innerhalb der x - y -Ebene möglich ist.

Die Länge dieses Stabs sei l , entsprechend Abbildung 3.10. Die allgemeine Knickgleichung für einen Euler-Stab lautet nach ([635] Kapitel 7.2):

$$w^{IV}(z) + \lambda^2 w''(z) = 0 \quad (\text{E.1})$$

$$\text{mit } \lambda^2 = \frac{F}{EI} \quad (\text{E.2})$$

Die allgemeine Lösung dieser Differentialgleichung sowie ihre Ableitungen lauten

$$w(z) = A \cos(\lambda z) + B \sin(\lambda z) + C \lambda z + D \quad (\text{E.3})$$

$$w'(z) = -A \lambda \sin(\lambda z) + B \lambda \cos(\lambda z) + C \lambda \quad (\text{E.4})$$

$$w''(z) = -A \lambda^2 \cos(\lambda z) - B \lambda^2 \sin(\lambda z) \quad (\text{E.5})$$

$$w'''(z) = A \lambda^3 \sin(\lambda z) - B \lambda^3 \cos(\lambda z) \quad (\text{E.6})$$

Beginnend mit dem einfachsten Fall sei zunächst das *statische Verhalten* nach Abbildung E.1 a) betrachtet, bei dem das obere Ende des Biegestabes frei ist

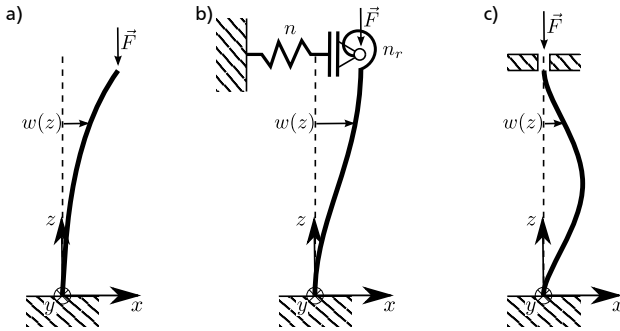


Abbildung E.1: Elastischer Stab unter senkrechter Krafteinwirkung (Euler-Stab) mit unterschiedlicher Lagerung am oberen Ende (Auslenkungen und Winkel stark übertrieben dargestellt): a) freies Ende, b) über Nachgiebigkeiten n und n_r eingeprägte Kräfte und Momente, c) durch Schiebehülse eingespanntes Ende.

und in negative z -Richtung eine Kraft \vec{F} einwirkt. Hier ergeben sich folgende Randbedingungen mit dem Moment M in negative y -Richtung und der Querkraft Q in x -Richtung

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.7})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow B + C = 0 \quad (\text{E.8})$$

$$M(l) = -EIw''(l) = 0 \quad (\text{E.9})$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = w'(l)F \quad (\text{E.10})$$

Damit ergibt sich aus (E.5) und (E.9)

$$A \cos(\lambda l) + B \sin(\lambda l) = 0 \quad (\text{E.11})$$

Weiterhin folgt aus (E.2), (E.4), (E.6), (E.8) und (E.10)

$$-EI\lambda^3 (A \sin(\lambda l) - B \cos(\lambda l)) = EI\lambda^3 (-A \sin(\lambda l) + B \cos(\lambda l) - B) \quad (\text{E.12})$$

$$\Leftrightarrow B = 0 \quad (\text{E.13})$$

Aus (E.11) und (E.13) folgt

$$\cos(\lambda l) = 0 \quad (\text{E.14})$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{\pi}{2l}(2n + 1) \quad \text{mit } n \in \mathbb{Z} \quad (\text{E.15})$$

Physikalisch bedeutend ist nur der kleinste positive Wert für λ , sodass für die kritische Kraft, ab der Knickung im *statischen Fall* auftritt, gilt

$$F_{\text{krit,stat}} = \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 EI = \text{statische Knicklast} \quad (\text{E.16})$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{F}{F_{\text{krit,stat}}}} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \quad (\text{E.17})$$

Zur Beschreibung der Sicherheitsreserve bevor Knicken eintritt, sei hier die *Knicksicherheit* definiert:

$$S_k = \frac{F_{\text{krit,stat}}}{F} = \left(\frac{\pi}{2l} \right)^2 \frac{EI}{F} = \text{Knicksicherheit} \quad (\text{E.18})$$

Im *Übergang zum dynamischen Fall* wirken sich die träge Masse und so wie das Trägheitsmoment des Masseblocks auf die Lagerung des oberen Biegestab-Endes aus, sodass dessen Auslenkung $w(l)$ und dessen Neigung $w'(l)$ beeinflusst werden. Diese Auswirkungen seien hier vereinfachend durch eine Zugfeder der Nachgiebigkeit n und eine Drehfeder der Nachgiebigkeit n_r modelliert, siehe Abbildung E.1 b). Sehr nachgiebige Federn ($n, n_r \rightarrow \infty$) beschreiben den statischen Fall nach Abbildung E.1 a) und Gleichung (E.16).

Die Randbedingungen für den *Übergangs-Fall* nach Abbildung E.1 b) lauten

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.19})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow B + C = 0 \quad (\text{E.20})$$

$$M(l) = -EIw''(l) = \frac{1}{n_r} w'(l) \quad (\text{E.21})$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = w'(l)F - \frac{1}{n} w(l) \quad (\text{E.22})$$

Aus den (E.4), (E.5), (E.20) und (E.21) folgt

$$EI\lambda^2(A\cos(\lambda l) + B\sin(\lambda l)) = \quad (E.23)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{n_r}\lambda(-A\sin(\lambda l) + B\cos(\lambda l) - B) \\ \Leftrightarrow & A\left(EI\lambda\cos(\lambda l) + \frac{1}{n_r}\sin(\lambda l)\right) + \quad (E.24) \\ & B\left(EI\lambda\sin(\lambda l) + \frac{1}{n_r}(1 - \cos(\lambda l))\right) = 0 \end{aligned}$$

Es folgt weiterhin aus (E.3), (E.4), (E.6), (E.19), (E.20) und (E.22)

$$\begin{aligned} -EI\lambda^3(A\sin(\lambda l) - B\cos(\lambda l)) = & EI\lambda^3(-A\sin(\lambda l) + B\cos(\lambda l) - B) - \\ & \frac{1}{n}(A(\cos(\lambda l) - 1) + B(\sin(\lambda l) - \lambda l)) \quad (E.25) \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow A\left(\frac{1}{n}(\cos(\lambda l) - 1)\right) + B\left(EI\lambda^3 + \frac{1}{n}(\sin(\lambda l) - \lambda l)\right) = 0 \quad (E.26)$$

Zur Lösung des Gleichungssystems aus (E.24) und (E.26) muss die Koeffizientendeterminante verschwinden ($\det(\mathbf{K}) = 0$), sodass folgt

$$\begin{aligned} (EI\lambda^2)^2\cos(\lambda l) + \frac{1}{n}EI\lambda(\sin(\lambda l) - \lambda l\cos(\lambda l)) + \quad (E.27) \\ \frac{1}{n_r}EI\lambda^3\sin(\lambda l) + \frac{1}{nn_r}(2 - 2\cos(\lambda l) - \lambda l\sin(\lambda l)) = 0 \end{aligned}$$

Gleichung (E.27) lässt sich analytisch nicht lösen, weshalb für eine beispielhafte numerische Rechnung hier folgende Vereinfachungen getroffen seien:

$$l = 1, EI = 1, n = n_r \quad (E.28)$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & \lambda^4\cos\lambda + \frac{1}{n}\lambda(\sin\lambda - \lambda\cos\lambda) + \quad (E.29) \\ & \frac{1}{n}\lambda^3\sin\lambda + \frac{1}{n^2}(2 - 2\cos\lambda - \lambda\sin\lambda) = 0 \end{aligned}$$

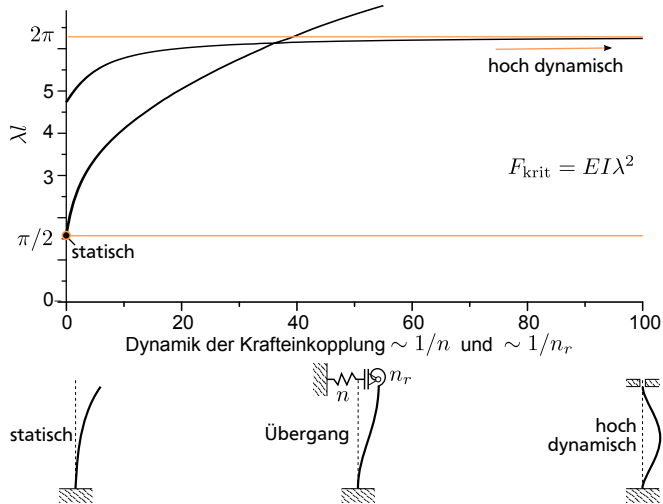


Abbildung E.2: Numerisch berechneter Eigenwert λ der Gleichung (E.29) in Abhängigkeit der durch die Nachgiebigkeiten n und n_r eingeprägten Kräfte und Momente.

Abbildung E.2 stellt einen Ausschnitt des Lösungsraums dar, wobei jeweils bezogen auf die Dynamik der Krafteinwirkung der kleinste positive Wert für den Eigenwert λ die physikalisch sinnvolle Lösung darstellt. Im statischen Fall gilt $\lambda = \pi/2l$, für steigende Dynamik strebt λ gegen $2\pi/l$.

Der Grenzfall für hohe Dynamik lässt sich leicht mit Abbildung E.1 c) nachvollziehen. Hier gelten die Randbedingungen

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.30})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow B + C = 0 \quad (\text{E.31})$$

$$w(l) = 0 \quad \rightarrow A(\cos(\lambda l) - 1) + B(\sin(\lambda l) - \lambda l) = 0 \quad (\text{E.32})$$

$$w'(l) = 0 \quad \rightarrow -A\lambda \sin(\lambda l) + B\lambda(\cos(\lambda l) - 1) = 0 \quad (\text{E.33})$$

Das Gleichungssystem aus (E.32) und (E.33) liefert bei verschwindender Koeffizientendeterminante ($\det(\mathbf{K}) = 0$) für den physikalisch sinnvollen Fall des kleinsten Werts für λ ungleich Null

$$\cos(\lambda l) = 1 - \frac{\lambda l}{2} \sin(\lambda l) \quad (\text{E.34})$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{l} \quad (\text{E.35})$$

Für die kritische Kraft, ab der Knickung im hoch *dynamischen Fall* auftritt, gilt

$$F_{\text{krit,dyn}} = \left(\frac{2\pi}{l} \right)^2 EI = 16F_{\text{krit,stat}} = \text{dynamische Knicklast} \quad (\text{E.36})$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{l} \sqrt{\frac{F}{F_{\text{krit,dyn}}}} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \quad (\text{E.37})$$

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das System bei steigender Dynamik eine höhere Knicklast erreicht, wobei jedoch auch höhere Kräfte auftreten.

E.2 Biegung nach Überschreiten der Knicklast

Zur Beschreibung der Durchbiegung $w(s)$ an der Stelle s nach Überschreiten der Knicklast F_{krit} – *Elastica* nach Euler [633] –, ist eine Theorie höherer Ordnung nötig, da dabei größere Winkel $\varphi(s) = \varphi$ auftreten. Neben w sind der Winkel φ und die vertikale Verschiebung $\Delta z(l) = \Delta z_l$ an den signifikanten Stellen des Biegestabs in Abhängigkeit der Kraft F zu bestimmen, um die Auswirkungen von $F > F_{\text{krit}}$ zu beurteilen.

Die allgemeine Differentialgleichung für einen Biegestab lautet nach ([710] Kapitel 5.4):

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} + \lambda^2 \sin \varphi = 0 \quad (\text{E.38})$$

$$\text{mit } \lambda^2 = \frac{F}{EI} \quad (\text{E.39})$$

Für $F > F_{\text{krit}}$ folgt durch Integration

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = \lambda^2 \cos \varphi + C \quad (\text{E.40})$$

Dabei hat man die Umkehrung der folgenden Ableitung berücksichtigt:

$$\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right) = \frac{d\varphi}{ds} \left(\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{d\varphi}{ds} \right) \right) = \frac{d^2\varphi}{ds^2} \quad (\text{E.41})$$

Für den *statischen Fall* nach Abbildung E.1 a) lauten die Randbedingungen

$$\varphi(0) = 0 \quad (\text{E.42})$$

$$M(l) = 0 \quad (\text{E.43})$$

Mit $M = -EI \frac{d\varphi}{ds}$ folgt somit für $\varphi(l) = \varphi_l$

$$C = -\lambda^2 \cos(\varphi_l) \quad (\text{E.44})$$

$$\Rightarrow \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 = 2\lambda^2 (\cos \varphi - \cos \varphi_l) \quad (\text{E.45})$$

$$\Rightarrow \frac{d\varphi}{ds} = \pm \sqrt{2\lambda^2 (\cos \varphi - \cos \varphi_l)} \quad (\text{E.46})$$

$$\Rightarrow s = \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^\varphi \frac{d\bar{\varphi}}{\sqrt{2 (\cos \bar{\varphi} - \cos \varphi_l)}} \quad (\text{E.47})$$

Zur Lösung dieses Integrals sei folgende Substitution verwendet

$$\sin \frac{\varphi}{2} = \sin \frac{\varphi_l}{2} \cdot \sin t \quad (\text{E.48})$$

Es gilt somit

$$\frac{1}{2} \cos \frac{\varphi}{2} d\varphi = \sin \frac{\varphi_l}{2} \cos t dt \quad (\text{E.49})$$

$$\Leftrightarrow d\varphi = 2 \frac{\sin \frac{\varphi_l}{2}}{\cos \frac{\varphi}{2}} \cos t dt \quad (\text{E.50})$$

Weiterhin nötig für die folgenden Umformungen sind das Additionstheorem $\cos \varphi = 1 - 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$ sowie die Folgerung aus (E.48), dass für $\varphi = 0$ gilt $t = 0$:

$$s = \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^\varphi \frac{d\bar{\varphi}}{2 \sqrt{\sin^2 \frac{\varphi_l}{2} - \sin^2 \frac{\bar{\varphi}}{2}}} \quad (\text{E.51})$$

$$= \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^t \frac{2 \frac{\sin \frac{\varphi_l}{2}}{\cos \frac{\bar{\varphi}}{2}} \cos \bar{t}}{2 \sin \frac{\varphi_l}{2} \sqrt{1 - \sin^2 \bar{t}}} d\bar{t} \quad (\text{E.52})$$

$$= \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi_l}{2} \sin^2 \bar{t}}} d\bar{t} \quad (\text{E.53})$$

Für das Ende des Stabes $s = l$ gilt laut (E.48) $t = \frac{\pi}{2}$:

$$l = \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dt}{\sqrt{1 - \sin^2 \frac{\varphi_l}{2} \sin^2 t}} \quad (\text{E.54})$$

$$= \pm \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{2} \left[1 + \left(\frac{1}{2} \right)^2 \sin^2 \frac{\varphi_l}{2} + \left(\frac{13}{24} \right)^2 \sin^4 \frac{\varphi_l}{2} + \dots \right] \quad (\text{E.55})$$

Bricht man die Reihenentwicklung nach dem zweiten Glied ab und nähert an $\sin \frac{\varphi_l}{2} \approx \frac{\varphi_l}{2}$, folgt für den physikalisch bedeutenden Teil des Lösungsraums mit (E.17)

$$l = \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\varphi_l^2}{16} \right) \quad (\text{E.56})$$

$$\Leftrightarrow \varphi_l^2 = 16 \left(\sqrt{\frac{1}{S_k}} - 1 \right) \quad (\text{E.57})$$

$$\Rightarrow \pm \varphi_l = 4 \sqrt{\sqrt{\frac{1}{S_k}} - 1} \quad (\text{E.58})$$

Bricht man die Reihenentwicklung für \sqrt{x} am Entwicklungspunkt $x = 1$ – woraus folgt $\sqrt{x} = 1 + \frac{x-1}{2} - \frac{1}{8}(x-1)^2 \dots$ – für den Ausdruck $\sqrt{\frac{1}{S_k}}$ ebenfalls nach dem zweiten Glied ab, folgt für den physikalisch sinnvollen Wert für φ_l mit $S_k < 1$ bzw. $F > F_{\text{krit,stat}}$

$$\varphi_l = \sqrt{8 \left(\frac{1}{S_k} - 1 \right)} \quad (\text{E.59})$$

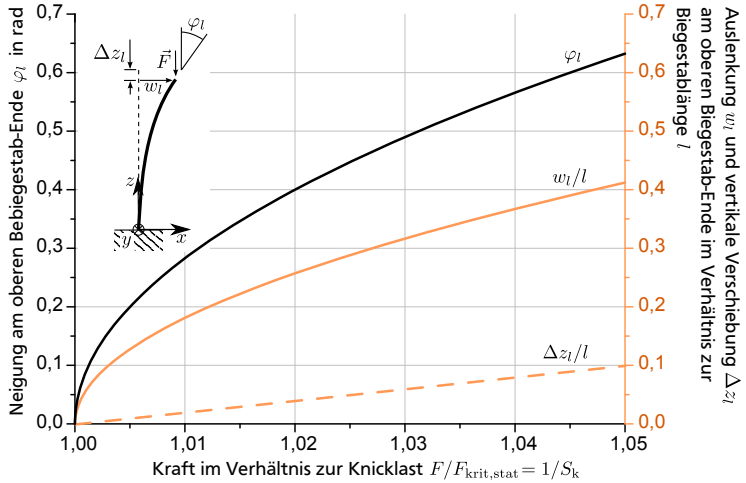


Abbildung E.3: Neigung φ_l , Durchbiegung w_l und vertikale Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende in Abhängigkeit der Kraft F für den *statischen Fall* nach Abbildung E.1 a).

Dieser Ausdruck stellt die Neigung des oberen Biegestab-Endes dar.

Für die Beschreibung der Durchbiegung $w(l)$ am oberen Biegestab-Ende sei weiterhin vereinfachend angenommen $\cos \varphi \approx 1 - \frac{\varphi^2}{2}$. Damit lässt sich Gleichung (E.47) wie folgt ausdrücken:

$$s = \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^\varphi \frac{d\bar{\varphi}}{\varphi_l \sqrt{1 - \left(\frac{\bar{\varphi}}{\varphi_l}\right)^2}} \quad (\text{E.60})$$

$$= \pm \frac{1}{\lambda} \arcsin \frac{\varphi}{\varphi_l} \quad (\text{E.61})$$

$$(\text{E.62})$$

Daraus folgt für den physikalisch relevanten Teil des Lösungsraums

$$\varphi = \pm \varphi_l \sin(\lambda s) \quad (\text{E.63})$$

Mit der weiteren Vereinfachung $\frac{dw}{ds} \approx \varphi = \varphi_l \sin(\lambda s)$ folgt durch Integration die horizontale Durchbiegung am oberen Biegestab-Ende $w(l) = w_l$. Mit der Annahme positiver Auslenkungen folgt

$$w_l = \frac{\varphi_l}{\lambda} (1 - \cos(\lambda l)) \quad (\text{E.64})$$

$$\Rightarrow \frac{w_l}{l} = \sqrt{8 \left(\frac{1}{S_k} - 1 \right)} \frac{2}{\pi} \sqrt{S_k} \left(1 - \cos \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) \right) \quad (\text{E.65})$$

Für die Beschreibung der vertikalen Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende sei zunächst Δz_l in Abhängigkeit von φ_l ausgedrückt. Aus dem Steigungsdreieck folgt

$$ds^2 = dz^2 + dw^2 \quad (\text{E.66})$$

$$\Rightarrow ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dz} \right)^2} dz \quad (\text{E.67})$$

Für $\left(\frac{dw}{dz} \right)^2 \ll 1$ und damit $d\Delta z \approx ds - dz$ folgt näherungsweise

$$\Delta z_l = \int_0^l ds - dz \quad (\text{E.68})$$

$$= \int_0^l \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dw}{dz} \right)^2} - 1 \right) dz \quad (\text{E.69})$$

$$\approx \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz \quad (\text{E.70})$$

Für kleine Auslenkungen w gilt näherungsweise $dz \approx ds$ und mit (E.63) gilt $\frac{dw}{dz} \approx \varphi \approx \varphi_l \cos(\lambda z)$. Damit folgt weiter mit $\lambda \approx \frac{2\pi}{l}$

$$\Delta z_l = \frac{1}{2} \int_0^l \varphi_l^2 \cos^2(\lambda z) dz \quad (\text{E.71})$$

$$\approx \frac{1}{4} \varphi_l^2 l \quad (\text{E.72})$$

$$= 2l \left(\frac{1}{S_k} - 1 \right) \quad (\text{E.73})$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta z_l}{l} = 2 \left(\frac{1}{S_k} - 1 \right) \quad (\text{E.74})$$

Dieses Ergebnis gilt nur für sehr kleine Winkel und Auslenkungen.

Abbildung E.3 zeigt den Verlauf von φ_l , w_l/l und $\Delta z/l$ in Abhängigkeit von $F/F_{\text{krit,stat}} = \frac{1}{S_k}$ für den statischen Fall nach Abbildung E.1 a). Überschreitet die Kraft F die statische Knicklast $F_{\text{krit,stat}}$ um nur 5%, entstehen am oberen Biegestab-Ende bereits eine Neigung φ_l von $0,632 \hat{=} 36,24^\circ$, eine horizontale Durchbiegung w_l von 41,2% der Biegestablänge und eine vertikale Verschiebung Δz_l von 10% der Biegestablänge. Für so große Winkel und Auslenkungen sind die oben getroffenen Vereinfachungen nur noch eingeschränkt gültig, jedoch zeigt diese Betrachtung die enormen Auswirkungen der Überschreitung von der Knicklast statischen $F_{\text{krit,stat}}$.

Für den *dynamischen Fall* nach Abbildung E.1 c) lauten die Randbedingungen

$$\varphi(0) = 0 \quad (\text{E.75})$$

$$\varphi(l) = 0 \quad (\text{E.76})$$

$$\frac{d\varphi(l/4)}{ds} = 0 \quad (\text{E.77})$$

Somit folgt für $\varphi(l/4) = \varphi_{l/4}$ analog zu Gleichungen (E.44) und (E.47)

$$C = -\lambda \cos \varphi_{l/4} \quad (\text{E.78})$$

$$\Rightarrow s = \pm \frac{1}{\lambda} \int_0^\varphi \frac{d\bar{\varphi}}{\sqrt{2(\cos \bar{\varphi} - \cos \varphi_{l/4})}} \quad (\text{E.79})$$

Mit der Substitution nach (E.48) und dem Abbruch der Reihenentwicklung nach dem zweiten Glied analog zu (E.59) folgt mit (E.37)

$$\frac{l}{4} = \frac{1}{\lambda} \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{\varphi_{l/4}^2}{16} \right) \quad (\text{E.80})$$

$$\Leftrightarrow \varphi_{l/4}^2 = 16 \left(\sqrt{\frac{1}{16S_k}} - 1 \right) \quad (\text{E.81})$$

$$\Rightarrow \varphi_{l/4} \approx \sqrt{8 \left(\frac{1}{16S_k} - 1 \right)} \quad (\text{E.82})$$

Dieser Ausdruck stellt die Neigung des Biegestabs bei einem Viertel seiner Länge dar.

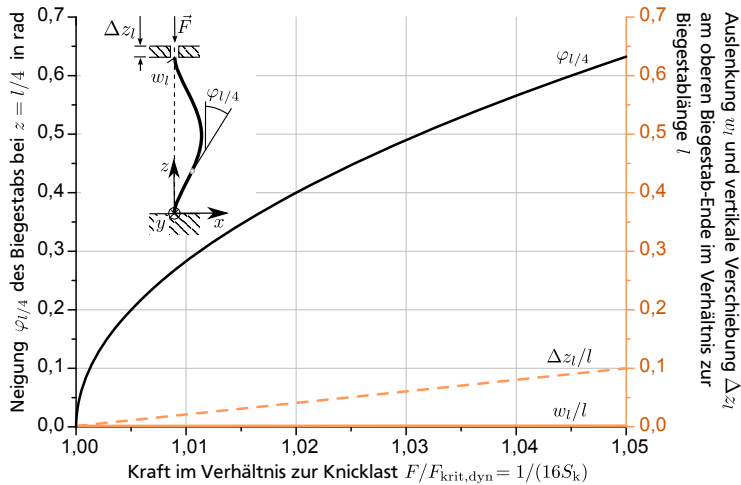


Abbildung E.4: Neigung $\varphi_{l/4}$ bei einem Viertel der Biegestab-Länge sowie Durchbiegung w_l und vertikale Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende in Abhängigkeit der Kraft F für den *dynamischen Fall* nach Abbildung E.1 c).

Die Durchbiegung am Biegestab-Ende ist definitionsgemäß $w_l = 0$. Für die vertikale Verschiebung Δz_l folgt durch Addition der vertikalen Verschiebungen von den vier Vierteln des Biegestabs analog zu (E.70)

$$\Delta z_l \approx 2 \int_0^{l/4} \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz \quad (\text{E.83})$$

Mit $dz \approx ds$ und $dw/ds \approx \varphi \approx \varphi_{l/4} \cos(\lambda z)$ folgt analog zu (E.74)

$$\frac{\Delta z_l}{l} = 2 \left(\frac{1}{16S_k} - 1 \right) \quad (\text{E.84})$$

Dieses Ergebnis gilt nur für sehr kleine Winkel und Auslenkungen.

Abbildung E.4 zeigt den Verlauf von $\varphi_{l/4}$, w_l/l und $\Delta z_l/l$ in Abhängigkeit von $F/F_{krit,dyn} = 1/(16S_k)$ für den dynamischen Fall nach Abbildung E.1 c). Im Vergleich zu φ_l in Abbildung E.3 zeigt der Verlauf des Winkels $\varphi_{l/4}$ bei 16-facher Kraft ($F_{krit,dyn} = 16 F_{krit,stat}$) den gleichen Winkel bereits bei $z =$

$l/4$. Die vertikale Verschiebung Δz_l ist im dynamischen Fall bei 16-facher Kraft so groß wie im statischen Fall bei einfacher Kraft. Sie ist in jedem Fall deutlich kleiner als die horizontale Durchbiegung w_l im statischen Fall.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit dem Überschreiten der Knicklast im statischen und im hoch dynamischen Fall erhebliche Biegungen des Stabes auftreten, die leicht den Hookschen Bereich der elastischen Verformung überschreiten können (vgl. plastisches Knicken in [711]).

E.3 Nicht ideale Verhältnisse

Wie in Abschnitt 4.1 dargestellt, treten neben Belastungen des ideal senkrechten Biegestabs im Einsatz der Struktur nach Abbildung 3.10 auch Kräfte in negative z -Richtung auf einen durchbogenen Biegestab auf, vgl. Abbildung E.5 a). Liegen Fertigungstoleranzen vor, kann der Biegestab unter einem Winkel $\neq \frac{\pi}{2}$ zum Substrat fixiert sein, vgl. Abbildung 4.1 b). Weiterhin kann der Schwerpunkt des Masseblocks nicht zentral über der Biegestabmitte liegen, vgl. Abbildung E.5 c). Darüber hinaus kann der Querschnitt des Biegestabs in den beiden lateralen Raumrichtungen variieren, vgl. Abbildung E.5 d). In der gleichen Teil-Abbildung ist auch dargestellt, wie das Flächenträgheitsmoment entlang der z -Achse variieren kann.

E.3.1 Senkrechte Druckkraft auf durchbogenen Biegestab

Die anfängliche Durchbiegung sei durch eine Kraft in positive x -Richtung F_x modelliert, die über einen starren Hebel der Länge $l_C - l$ am oberen Biegestab-Ende angreift, sodass sich unter Einwirken der vertikalen Last F_z für den *statischen Fall* nach Abbildung 4.1 a) die folgenden Randbedingungen ergeben

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.85})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow B + C = 0 \quad (\text{E.86})$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = w'(l)F_z + F_x \quad \rightarrow -C = B = \frac{F_x}{\lambda F_z} \quad (\text{E.87})$$

$$M(l) = -EIw''(l) = -(l_C - l)F_x \quad (\text{E.88})$$

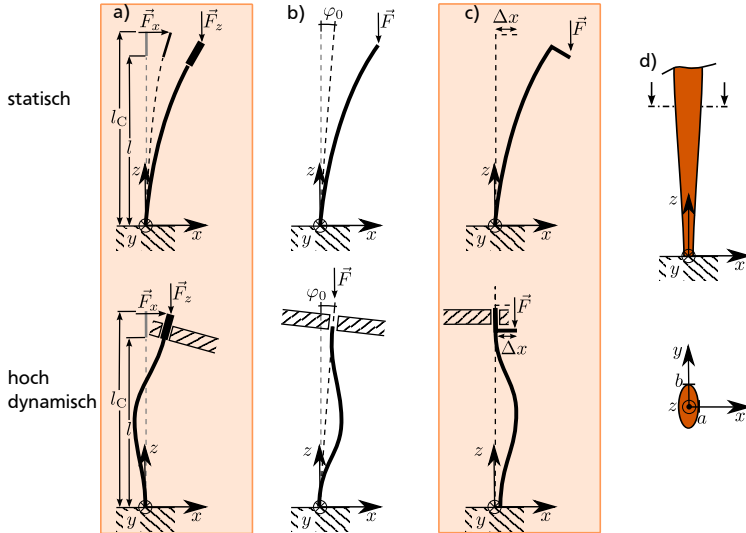


Abbildung E.5: Beispiele für nicht ideale Verhältnisse bei senkrechter Krafteinwirkung im *statischen* und im *hoch dynamischen* Fall: a) Durchbogener Biegestab, b) Schräg stehender Biegestab, c) Außermittiger Kraftangriff, d) Variierende Flächenträgheitsmomente (gleich für statisch und hoch dynamisch).

Die Folgerungen für B und C in (E.87) ergeben sich analog zu (E.12) und (E.13). Für A und D folgt durch Einsetzen von B in (E.88)

$$-D = A = \frac{F_x}{\lambda F_z} \left(\frac{\lambda(l - l_C)}{\cos(\lambda l)} - \tan(\lambda l) \right) \quad (\text{E.89})$$

Daraus folgt für den statischen Fall mit $\lambda = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{F_z}{F_{\text{krit,stat}}}} = \frac{2\pi}{l} \sqrt{\frac{1}{s_k}}$ und (E.4)

$$\varphi_l \approx w'(l) = \frac{F_x}{\lambda F_z} \left(\frac{\lambda(l_C - l)}{\cos(\lambda l)} + \tan(\lambda l) \right) \lambda \sin(\lambda l) + \frac{F_x}{\lambda F_z} \lambda (\cos(\lambda l) - 1) \quad (\text{E.90})$$

$$\varphi_l \frac{EI}{l^2 F_x} \approx \frac{4}{\pi^2} S_k \left(\cos \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) - 1 + \tan \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \left(\frac{l_c - l}{l} \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) \right) \right) \quad (\text{E.91})$$

Weiterhin folgt mit (E.3)

$$w_l = \frac{F_x}{\lambda F_z} \left(\tan(\lambda l) - \lambda l_c + \frac{\lambda(l_c - l)}{\cos(\lambda l)} \right) \quad (\text{E.92})$$

$$\Rightarrow w_l \frac{EI}{l^3 F_x} = \frac{8}{\pi^3} (S_k)^{\frac{3}{2}} \left(\tan \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) - \frac{l_c}{l} \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} + \frac{\frac{l_c - l}{l} \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}}{\cos \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right)} \right) \quad (\text{E.93})$$

Die vertikale Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende ergibt sich analog zu (E.70) mit Einsetzen von (E.87) und (E.89) in (E.4) zu

$$\Delta z_l \approx \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz = \quad (\text{E.94})$$

$$\frac{F_x^2}{2F_z^2} \int_0^l \left(\left(\frac{\lambda(l_c - l)}{\cos(\lambda l)} + \tan(\lambda l) \right) \cdot \sin(\lambda z) + \cos(\lambda z) - 1 \right)^2 dz \quad (\text{E.95})$$

$$\begin{aligned}
\Rightarrow \Delta z_l \frac{E^2 I^2}{l^5 F_x^2} &\approx \frac{4 (S_k)^{\frac{5}{2}}}{\pi^5 \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right)} \left(\left(\frac{l_C - l}{2l} \right)^2 \left(\pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right)^3 + \right. \\
&2 \frac{l_C}{l} \pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} + \frac{l_C - l}{l} \pi^2 \frac{1}{S_k} \sin \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) + \\
&\frac{2l_C - l}{l} \pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} \cos \left(\pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) - \\
&4 \frac{l_C - l}{l} \pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} \cos \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) - \\
&\left. \sin \left(\pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} \right) \left(3 + \left(\frac{l_C - l}{2l} \right)^2 \pi^2 \frac{1}{S_k} \right) \right)
\end{aligned} \tag{E.96}$$

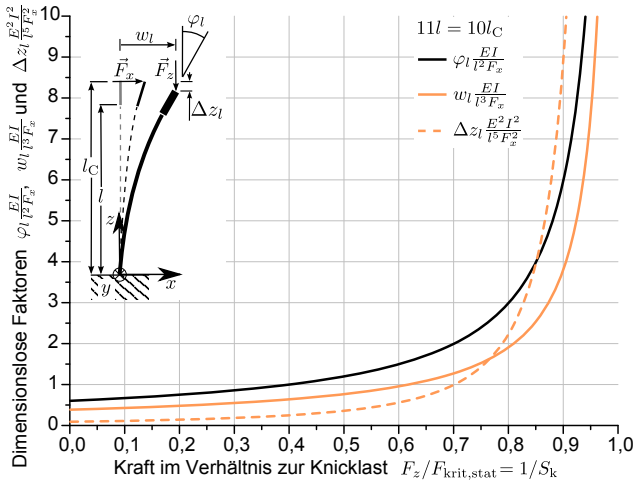


Abbildung E.6: Dimensionslose Faktoren, die proportional sind zu Neigung φ_l , Durchbiegung w_l und vertikaler Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende in Abhängigkeit der Kraft F_z unter der Annahme $11l = 10l_C$ für den statischen Fall nach Abbildung 4.1 a).

Die Gleichungen (E.93) sowie insbesondere (E.91) und (E.96) gelten nur für kleine Winkel φ_l , vermitteln jedoch wie in Abbildung E.6 dargestellt einen Eindruck über das Biegeverhalten in Abhängigkeit der Kraft F_z im Verhältnis

zur statischen Knicklast $F_{\text{krit,stat}}$: Bereits bei Kräften wesentlich kleiner als der Knicklast treten Material- und Geometrie-abhängige Neigungen, Durchbiegungen und vertikale Verschiebungen auf. Insbesondere ergeben sich für $a_z = 1g$ (auf der Abszisse nahe des Koordinatenursprungs) die dimensionslosen Faktoren nach Abbildung E.6 sowie die Knicksicherheit zu:

$$\varphi_l \frac{EI}{l^2 F_x} = 0,600 \quad \sim \text{Neigung} \quad (\text{E.97})$$

$$w_l \frac{EI}{l^3 F_x} = 0,383 \quad \sim \text{Durchbiegung} \quad (\text{E.98})$$

$$\Delta z_l \frac{E^2 I^2}{l^5 F_x^2} = 0,089 \quad \sim \text{Vertikale Verschiebung} \quad (\text{E.99})$$

$$S_{k,1g} = 5158 \quad \text{Knicksicherheit bei } F_z = m \cdot 1g \quad (\text{E.100})$$

Im *hoch dynamischen Fall* nach Abbildung 4.1 a) sind zunächst die Ausgangsbedingungen der statischen Auslenkung durch die horizontale Kraft F_x zu analysieren. Die Differentialgleichung der Biegelinie für $(w')^2 \ll 1$ lautet nach ([635] Kapitel 4.2) mit dem Moment $M(z) = M$ in negative y -Richtung und der Querkraft $Q(z) = Q$ in positive x -Richtung

$$w''(z) = -\frac{M}{EI} \quad (\text{E.101})$$

Daraus folgt

$$(EIw''(z))' = -Q \quad (\text{E.102})$$

$$EIw''(z) = -M = -Qz + C_0 \quad (\text{E.103})$$

$$EIw'(z) = -\frac{1}{2}Qz^2 + C_0z + C_1 \quad (\text{E.104})$$

$$EIw(z) = -\frac{1}{6}Qz^3 + \frac{1}{2}C_0z^2 + C_1z + C_2 \quad (\text{E.105})$$

Für rein horizontale Krafteinwirkung F_x folgt aus diesen vier Gleichungen

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow C_2 = 0 \quad (\text{E.106})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow C_1 = 0 \quad (\text{E.107})$$

$$Q(l) = F_x \quad (\text{E.108})$$

$$M(l) = -(l_C - l) F_x \quad \rightarrow C_0 = F_x l_C \quad (\text{E.109})$$

Somit ergibt sich durch Einsetzen der Lösungen für die Integrationskonstanten C_0 , C_1 und C_2 in die allgemeine Lösung der Differentialgleichung sowie ihrer Ableitungen für $0 \leq z \leq l$

$$w(z) = \frac{F_x z^2}{2EI} \left(l_C - \frac{z}{3} \right) \quad \rightarrow w_l = \frac{F_x l^2}{2EI} \left(l_C - \frac{l}{3} \right) \quad (\text{E.110})$$

$$w'(z) = \frac{F_x z}{EI} \left(l_C - \frac{z}{2} \right) \quad \rightarrow w'_l = \frac{F_x l}{EI} \left(l_C - \frac{l}{2} \right) \quad (\text{E.111})$$

Für die hoch dynamische vertikale Krafteinwirkung F_z ergeben sich damit folgende Randbedingungen

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.112})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow B + C = 0 \quad (\text{E.113})$$

$$w(l) = w_l \text{ nach (E.110)} \quad (\text{E.114})$$

$$w'(l) = w'_l \text{ nach (E.111)} \quad (\text{E.115})$$

Unter Berücksichtigung von (E.112) und (E.113) resultiert aus (E.114) und (E.115) mit (E.3) und (E.4) das folgende Gleichungssystem in Matrix-Schreibweise

$$\mathbf{K} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (\text{E.116})$$

mit

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} -\lambda \sin(\lambda l) & \lambda \cos(\lambda l) - \lambda \\ \cos(\lambda l) - 1 & \sin(\lambda l) - \lambda l \end{pmatrix} \quad (\text{E.117})$$

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} \quad (\text{E.118})$$

$$\mathbf{b} = \frac{F_x l}{6EI} \begin{pmatrix} 6l_C - 3l \\ 3ll_C - l^2 \end{pmatrix} \quad (\text{E.119})$$

Unter der Bedingung $\det(\mathbf{K}) \neq 0$ kann die Cramersche Regel angewandt werden. Die Subdeterminante $\det(\mathbf{K}_i)$ sei gebildet, indem die i -te Spalte

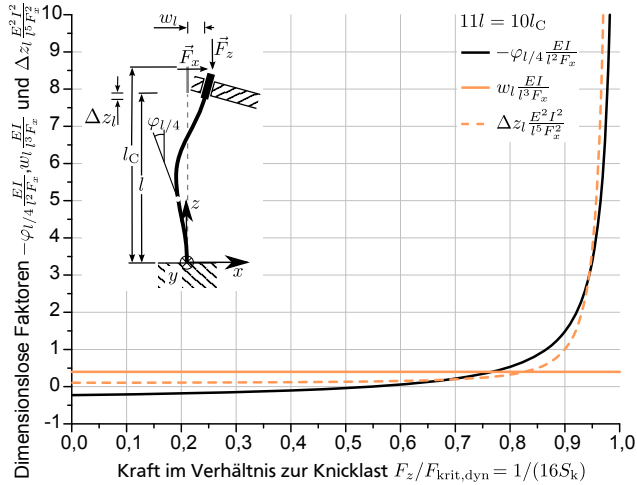


Abbildung E.7: Dimensionslose Faktoren, die proportional sind zur negativen Neigung $-\varphi_{l/4}$, Durchbiegung w_l und vertikaler Verschiebung Δz_l in Abhängigkeit der Kraft F_z unter der Annahme $11l = 10l_C$ für den hoch dynamischen Fall nach Abbildung 4.1 a).

von **K** durch die rechte Seite des Gleichungssystems **b** ersetzt wird. Somit folgt

$$A = \frac{\det(\mathbf{K}_1)}{\det(\mathbf{K})} \quad (\text{E.120})$$

$$= \frac{F_x l}{6EI\lambda} \frac{\lambda l(2l - 3l_C) + \lambda l(l - 3l_C)\cos(\lambda l) - 3(l - 2l_C)\sin(\lambda l)}{2\cos(\lambda l) - 2 + \lambda l \sin(\lambda l)}$$

$$B = \frac{\det(\mathbf{K}_2)}{\det(\mathbf{K})} \quad (\text{E.121})$$

$$= \frac{F_x l}{6EI\lambda} \frac{6l_C - 3l + 3(l - 2l_C)\cos(\lambda l) + \lambda l(l - 3l_C)\sin(\lambda l)}{2\cos(\lambda l) - 2 + \lambda l \sin(\lambda l)}$$

Daraus folgt für den hoch dynamischen Fall mit $\lambda = \frac{2\pi}{l} \sqrt{\frac{F_z}{F_{\text{krit,dyn}}}} = \frac{\pi}{2l} \sqrt{\frac{1}{s_k}}$

$$\varphi(l/4) \frac{EI}{l^2 F_x} \approx - \frac{EI\lambda}{l^2 F_x} \left(A \sin\left(\frac{\lambda l}{4}\right) - B \left(\cos\left(\frac{\lambda l}{4}\right) - 1 \right) \right) \quad (\text{E.122})$$

$$w_l \frac{EI}{l^3 F_x} = \frac{1}{2} \frac{l_c}{l} - \frac{1}{6} \quad (\text{E.123})$$

$$\Delta z \frac{E^2 I^2}{l^5 F_x^2} \approx \frac{E^2 I^2 \lambda^2}{2l^5 F_x^2} \int_0^l (A \sin(\lambda z) - B(\cos(\lambda z) - 1))^2 dz \quad (\text{E.124})$$

Aufgrund der Länge der Ausdrücke sei hier auf das explizite Einsetzen von (E.120) und (E.121) in (E.122) bis (E.124) verzichtet. Vor allem in (E.122) und (E.124) seien kleine Winkel vorausgesetzt. Abbildung E.7 verdeutlicht die Zusammenhänge am durch die vertikale Kraft F_z belasteten Stab mit einer vor der Belastung eingestellten Neigung, die durch die horizontale Kraft F_x am Hebel der Länge $l_c - l$ modelliert ist. Der Vergleich mit Abbildung E.6 zeigt, dass das System im hoch dynamischen Fall widerstandsfähiger ist, selbst bei vierfacher Kraft.

E.3.2 Senkrechte Kraft auf schräg stehenden Biegestab

Die initiale Neigung für den *statischen Fall* nach Abbildung 4.1 b) betrage φ_0 , sodass sich folgende Randbedingungen ergeben

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.125})$$

$$w'(0) = \varphi_0 \quad \rightarrow B + C = \frac{\varphi_0}{\lambda} \quad (\text{E.126})$$

$$M(l) = -EI w''(l) = 0 \quad (\text{E.127})$$

$$Q(l) = -EI w'''(l) = w'(l)F \quad (\text{E.128})$$

Aus (E.4), (E.6), (E.126) und (E.128) folgt

$$-A\lambda \sin(\lambda l) + B\lambda \cos(\lambda l) = -A\lambda \sin(\lambda l) + B\lambda \cos(\lambda l) + \varphi_0 - B\lambda \quad (\text{E.129})$$

$$\Leftrightarrow B = \frac{\varphi_0}{\lambda} \quad C = 0 \quad (\text{E.130})$$

Aus (E.5), (E.125), (E.127) und (E.130) folgt

$$A\lambda^2 \cos(\lambda l) + \varphi_0 \lambda \sin(\lambda l) = 0 \quad (\text{E.131})$$

$$\Leftrightarrow A = -\frac{\varphi_0}{\lambda} \tan(\lambda l) \quad D = \frac{\varphi_0}{\lambda} \tan(\lambda l) \quad (\text{E.132})$$

Damit ergibt sich durch Einsetzen von (E.130) und (E.132) in (E.4):

$$\varphi_l \approx w'(l) = \varphi_0 \cos(\lambda l) \left(1 + \tan^2(\lambda l)\right) \quad (\text{E.133})$$

$$\Rightarrow \varphi_l \frac{1}{\varphi_0} \approx \cos\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right) \left(1 + \tan^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right)\right) \quad (\text{E.134})$$

Aus (E.130), (E.132) und (E.3) folgt

$$w_l = \frac{\varphi_0}{\lambda} \tan(\lambda l) \quad (\text{E.135})$$

$$\Rightarrow w_l \frac{1}{\varphi_0 l} = \frac{2}{\pi} \sqrt{S_k} \tan\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right) \quad (\text{E.136})$$

Weiter folgt analog zu (E.70) mit $\left(\frac{dw}{dz}\right)^2 \ll 1$ sowie (E.3), (E.130) und (E.132)

$$\Delta z_l \approx \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dw}{dz}\right)^2 dz \quad (\text{E.137})$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^l (\varphi_0 \tan(\lambda l) \sin(\lambda z) + \varphi_0 \cos(\lambda z))^2 dz \quad (\text{E.138})$$

$$= \frac{\varphi_0^2}{4\lambda} \left(\frac{\lambda l}{\cos^2(\lambda l)} + \tan(\lambda l)\right) \quad (\text{E.139})$$

$$\Rightarrow \Delta z_l \frac{1}{\varphi_0^2 l} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{S_k} \left(\frac{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}}{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right)} + \tan\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right)\right) \quad (\text{E.140})$$

Abbildung E.8 zeigt den Verlauf von Neigung, Durchbiegung und vertikaler Kraft in Abhängigkeit der vertikalen Kraft. Material- und Geometrieabhängigkeiten des Biegestabs sind allein durch $F_{\text{krit,stat}}$ nach (E.16) bzw. S_k nach (E.18) ausgedrückt.

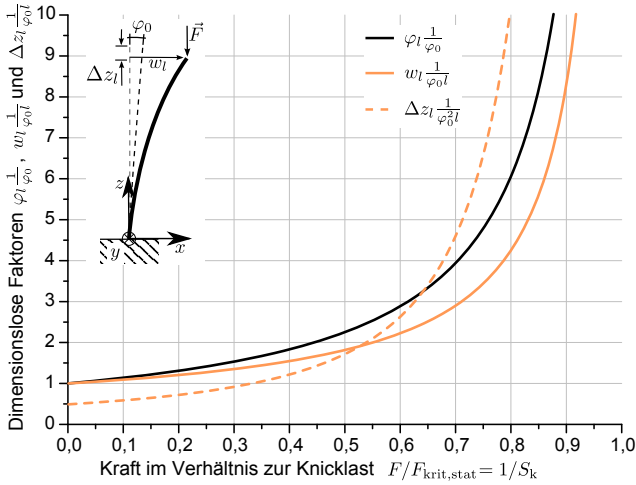


Abbildung E.8: Dimensionslose Faktoren, die proportional sind zu Neigung φ_l , Durchbiegung w_l und vertikaler Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende in Abhängigkeit der Kraft F für den statischen Fall nach Abbildung 4.1 b).

Im *hoch dynamischen Fall* sind die Querkraft $Q(l)$, die Auslenkung w_l und die Neigung φ_l blockiert, in Abbildung 4.1 b) dargestellt durch die Schiebehülse. Dieser Fall lässt sich entsprechend (E.16), (E.82), (E.84) und Abbildung E.4 beschreiben, wobei sich durch die initiale Neigung φ_0 nur geringfügige Änderungen für die Biegung nach Überschreiten der Knicklast ergeben:

$$\varphi_{l/4} \approx \varphi_0 + \sqrt{8 \left(\sqrt{\frac{1 - \varphi_0}{16S_k}} - 1 \right)} \quad (\text{E.141})$$

$$w_l \frac{1}{l} \approx \varphi_0 \quad (\text{E.142})$$

$$\Delta z_l \frac{1}{l} \approx \frac{\varphi_0^2}{2} + 2 \left(\frac{1 - \varphi_0}{16S_k} - 1 \right) \quad (\text{E.143})$$

E.3.3 Außenmittiger Kraftangriff

Der laterale Versatz des Kraftangriffspunkts Δx sei durch ein nicht flexibles Winkelstück in Abbildung E.8 c) dargestellt (vgl. auch [712]). Für den *statischen Fall* ergeben sich die folgenden Randbedingungen (vgl. (E.85) bis (E.88) sowie (E.12) und (E.13))

$$w(0) = 0 \quad \rightarrow A + D = 0 \quad (\text{E.144})$$

$$w'(0) = 0 \quad \rightarrow B + C = 0 \quad (\text{E.145})$$

$$Q(l) = -EIw'''(l) = w'(l)F \quad \rightarrow B = 0 \quad C = 0 \quad (\text{E.146})$$

$$M(l) = -EIw''(l) = -F\Delta x \quad \rightarrow -A = D = \frac{\Delta x}{\cos(\lambda l)} \quad (\text{E.147})$$

Damit folgt aus (E.4) mit (E.17)

$$\varphi_l \approx w'(l) = \lambda \Delta x \tan(\lambda l) \quad (\text{E.148})$$

$$\Rightarrow \varphi_l \frac{l}{\Delta x} \approx \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right) \quad (\text{E.149})$$

Weiterhin folgt aus (E.3)

$$w_l = \Delta x \left(\frac{1}{\cos(\lambda l)} - 1 \right) \quad (\text{E.150})$$

$$\Rightarrow w_l \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right)} - 1 \quad (\text{E.151})$$

Analog zu (E.70) ergibt sich

$$\Delta z_l \approx \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{dw}{dz} \right)^2 dz = \frac{\lambda^2 \Delta x^2}{2 \cos^2(\lambda l)} \int_0^l \sin^2(\lambda z) dz \quad (\text{E.152})$$

$$= \frac{\Delta x^2 \lambda}{8 \cos^2(\lambda l)} (2\lambda l - \sin(2\lambda l)) \quad (\text{E.153})$$

$$\Rightarrow \Delta z_l \frac{l}{\Delta x^2} \approx \frac{\pi}{16} \frac{\pi \sqrt{\frac{1}{S_k}} - \sin\left(\pi \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right)}{\cos^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{1}{S_k}}\right)} \sqrt{\frac{1}{S_k}} \quad (\text{E.154})$$

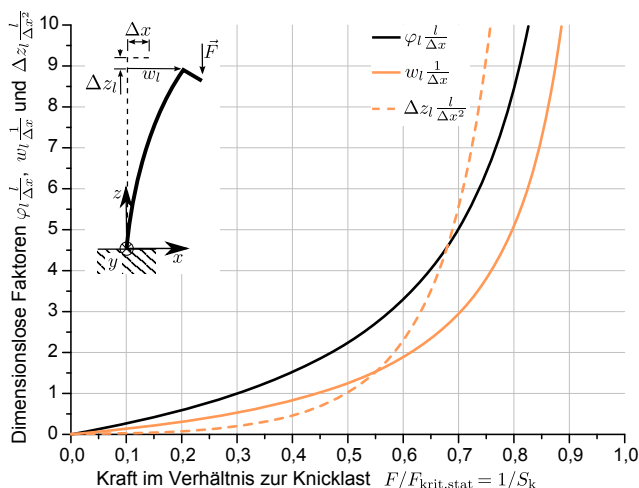


Abbildung E.9: Dimensionslose Faktoren, die proportional sind zu Neigung φ_l , Durchbiegung w_l und vertikaler Verschiebung Δz_l am oberen Biegestab-Ende in Abhängigkeit der Kraft F für den *statischen Fall* nach Abbildung 4.1 c).

Abbildung E.9 zeigt den Verlauf der Neigung (E.149), der Auslenkung (E.151) und der vertikalen Verschiebung (E.154) für kleine Winkel in Abhängigkeit der Kraft.

Im *hoch dynamischen Fall* führt die Schiebehülse in Abbildung 4.1 c) zur Blockierung der Querkraft $Q(l)$, der Auslenkung w_l und der Neigung φ_l , sodass die Verschiebung des Kraftangriffspunkts Δx keine Auswirkung hat. Damit ist dieser Fall mit (E.16), (E.82), (E.84) und Abbildung E.4 vollständig beschrieben.

In der praktischen Anwendung wird eine verhältnismäßig geringe senkrechte Kraft statisch auf den Stab wirken und hoch dynamisch wird eine wesentlich größere kurzzeitig hinzu kommen – eine Schockbelastung. Bei einem schräg stehenden Biegestab wird daher ebenso wie bei einem außenmittigen Kraftangriff durch die statische Belastung eine Durchbiegung des Stabes bereits vorliegen, wenn der hoch dynamische Fall eintritt. Daraus folgt, dass der Fall nach Abbildung E.7 am relevantesten für die hochdynamische Belastung ist.

E.3.4 Variierende Flächenträgheitsmomente

Ist der Querschnitt des Biegestabs nicht in lateraler Ausdehnung kreisförmig, sondern wie in Abbildung E.8 d) z. B. ellipsenförmig, variieren das Flächenträgheitsmoment und damit die Biegesteifigkeit je nach Raumrichtung.

Mit der Ellipsengleichung lassen sich die beiden Flächenträgheitsmomente ausdrücken

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1 \quad (\text{E.155})$$

Unter Verwendung der Substitution $y = b \sin \frac{\varphi}{2}$ folgt ([635] Kapitel 4.2)

$$I_x = \int y^2 dA = \int_{-b}^b y^2 \left(\int_{-a\sqrt{1-(y/b)^2}}^{a\sqrt{1-(y/b)^2}} d\bar{y} \right) dy \quad (\text{E.156})$$

$$= ab^3 \int_{-\pi}^{\pi} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cos^2 \frac{\varphi}{2} d\varphi \quad (\text{E.157})$$

$$= \frac{\pi}{4} ab^3 \quad (\text{E.158})$$

Analog folgt

$$I_y = \frac{\pi}{4} ba^3 \quad (\text{E.159})$$

Findet eine Biegung innerhalb der x - y -Ebene nicht genau in Richtung einer der beiden Achsen statt, so ist sie als Superposition zweier Biegungen jeweils genau in Richtung einer der beiden Achsen zu betrachten.

Die kontinuierliche Änderung des Querschnitts entlang der z -Achse nach Abbildung E.8 d) lässt sich mit (E.1) durch ein Flächenträgheitsmoment als Funktion von z ausdrücken

$$(EI(z)w'')'' + Fw'' = 0 \quad (\text{E.160})$$

$$\Leftrightarrow f''(z)w^{IV} + \lambda^2 w'' = 0 \quad (\text{E.161})$$

mit

$$I(z) = I_0 f(z) \quad (\text{E.162})$$

$$\lambda^2 = \frac{F}{EI_0} \quad (\text{E.163})$$

Diese Gleichung kann allerdings je nach Funktion $f(z)$ sehr aufwendig zu lösen sein. Zur Stabilitätsabschätzung kann das geringste Flächenträgheitsmoment entlang z dienen oder es kann eine abschnittsweise Definition des Querschnitts durch das Föppl-Symbol zur Anwendung kommen mit

$$\langle z - a \rangle^0 = \begin{cases} 0 & z < a \\ 1 & z \geq a \end{cases} \quad (\text{E.164})$$

E.4 Massebehafteter Biegestab

Für einen massebehafteten Biegestab sei ein Biegestabstückchen der Länge ds am Ort z betrachtet, vgl. Abbildung E.1 a). Die verteilte Querkraft (Linielast) aufgrund der Beschleunigung a_x in negative x -Richtung betrage

$$q = \frac{m_{\text{Stab}} a_x}{l} \quad (\text{E.165})$$

mit

$$m_{\text{Stab}} = \rho l \pi \left(\frac{d_w}{2} \right)^2 \quad (\text{E.166})$$

$$(\text{E.167})$$

Daraus folgt

$$EI w''(z) = q \int_z^l (s - z) ds \quad (\text{E.168})$$

$$= \frac{q}{2} (l^2 - 2lz + z^2) \quad (\text{E.169})$$

$$EI w'(z) = \frac{q}{6} (3l^2 z - 3lz^2 + z^3) \quad (\text{E.170})$$

$$EI w(z) = \frac{q}{24} (6l^2 z^2 - 4lz^3 + z^4) \quad (\text{E.171})$$

Mit der Definition der translatorischen Nachgiebigkeit $n = \xi/F$ und $F = m_{\text{Stab}} a_x$ folgt aus (E.165) und (E.171):

$$n_{x,\text{Stab}} = \frac{w(l)}{ql} = \frac{l^3}{8EI} \quad (\text{E.172})$$

Die gesamte Masse des Biegestabs führt zum Eintrag des Moments

$$M_l = \int_0^l q s ds = \frac{q}{2} l^2 \quad (\text{E.173})$$

Damit folgt mit der Definition der rotatorischen Nachgiebigkeit $n_{\text{rot}} = \varphi / M$ und (E.173)

$$n_{\text{rot,y,Stab}} = \frac{w'_l}{M_l} = \frac{l}{3EI} \quad (\text{E.174})$$

Das Massenträgheitsmoment des Biegestabs für die Rotation um die y -Achse ergibt sich wie folgt:

$$\Theta_{y,\text{Stab}} = \rho \int r^2 dV = \rho \frac{d_w^2}{4} \pi \int_0^l s^2 ds \quad (\text{E.175})$$

$$= \frac{\rho \pi d_w^2 l^3}{12} \quad (\text{E.176})$$



Wissenschaftlicher Werdegang



Felix Greiner

geboren am 27. März 1980 in Schwalmstadt,
verheiratet

Studium

2000 - 2006	Technische Universität Darmstadt, Elektrotechnik und Informationstechnik, Vertiefung Mikro- und Feinwerktechnik Abschluss: Diplom-Ingenieur
2003 - 2004	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Section Microtechnique ERASMUS-Programm, Studienarbeit

Berufliche Tätigkeit

seit 2006	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme
2008 - 2009	Nebentätigkeit als Wissenschaftlicher Journalist: Studie „Mikro-Nano-Integration“, <i>mst Netzwerk Rhein-Main e.V.</i>
2009	Preisträger E-Teaching-Award: Kategorien „best-practice“ und „student-proof“
2013	Auszeichnung der Veröffentlichung [7]: „IOP select“ durch den Verlag und „GMM-Preis“ durch die VDE/VDI-Gesellschaft Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik

Praktika

2000	<i>Merkel Freudenberg Fluidtechnic</i> , Schwalmstadt
2001-2002	<i>Vigor Gesellschaft für Energiesparteknik</i> , Darmstadt
2005	<i>Institut für Mikrotechnik Mainz</i> , Mainz